

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

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 330, № 12, 2019

Издательство Томского политехнического университета 2019

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия) Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия) Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия) Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция) Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина) Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия) Белозеров В.Б., 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) Уленеков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия) Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия) Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия) Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия) Тойпель У., Dsc (Германия) Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея) Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия) Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия) Ханьялич К., Dsc (Нидерланды) Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия) Алексеенко 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 (Южная Корея) Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия) Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия) Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия) Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия) Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия) Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия) Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия) Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия) Голик В.И., д-р техн. наук (Россия) Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия) Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия) Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия) Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия) Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия) Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия) Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых

научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



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

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEO ASSETS ENGINEERING

Volume 330, № 12, 2019

Tomsk Polytechnic University Publishing House 2019

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

© Tomsk Polytechnic University, 2019

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

7

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Применение компьютерного моделирования для устойчивой эксплуатации термальных подземных вод Ханкальского месторождения Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Исмагилов Р.А., Хайрулина Л.А.
 - Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин Попова М.С., Харитонов А.Ю.
- Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник Нос О.В., Востриков А.С., Штанг А.А., Малявко Е.Ю.
- Использование осадкогелеобразующей композиции для снижения обводненности скважин на нефтяной залежи с высоковязкой нефтью Поплыгина И.С., Мордвинов В.А.
- Комплексные решения по повышению эффективности разработки многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений Пономарёв А.И., Ситдиков Р.Ф., Ибатулин А.А., Федоров А.Э., Муслимов Б.Ш.
 - Влияния высот лопаток рабочего колеса центростремительной турбины на газодинамику течения Пассар А.В.
 - Расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса газопровода по усталостной прочности Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В.
- Диагностирование вертикальных стальных резервуаров как инструмент повышения безопасности эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли Федосов А.В., Абдрахманов Н.Х., Вадулина Н.В., Хафизова Д.Ф., Абдрахманова К.Н.
- Исследование геодинамики массива в зоне сопряжения очистных и подготовительных выработок Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М., Стась Г.В.
 - Оценка влияния бенз(а)пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области Минникова Т.В., Сушкова С.Н., Манджиева С.С., Минкина Т.М., Колесников С.И.
 - Зависимость теплового состояния 103 электроцентробежного насоса от частоты вращения двигателя
 - Сарачева Д.А., Вахитова Р.И., Уразаков К.Р.
 - Прогнозирование биодеградации тяжелой нефти 111 ассоциацией аборигенных нефтедеструктирующих микроорганизмов Сафаров А.Х., Водопьянов В.В., Ягафарова Г.Г.,
 - Дусаева Я.М., Акчурина Л.Р.
 - Электромагнитная сушка влажных материалов с 119 малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией. II. Стадия постоянной скорости сушки Саломатов В.В., Карелин В.А., Саломатов В.В.
- Характеристика распределения прорывов глинистых отложений в горные выработки из вышележащих осадочных пород Ефремов Е.Ю.
 126

- Use of computer modelling for the Khankala geothermal waters sustainable exploitation Farkhutdinov A.M., Farkhutdinov I.M., Cherkasov S.V., Ismagilov R.A., Khairulina L.A.
- 18 Computer simulation of processes at well drilling Popova M.S., Kharitonov A.Yu.
- 28 Enhancing energy efficiency of industrial production by using power harmonic filters Nos O.V., Vostrikov A.S., Shtang A.A., Malyavko E.Yu.
- 36 Flooding and the results of waterproofing works with the use of precipitation-gel composition Poplygina I.S., Mordvinov V.A.
- 44 Complex solutions to increase the efficiency of development of multi-layer gas and gas-condensate fields Ponomarev A.I., Sitdikov R.F., Ibatulin A.A., Fedorov A.E., Muslimov B.Sh.
- 54 Influence of blade height in centripetal turbine impeller on flow gas dynamics Passar A.V.
- 64 Computational and experimental method for evaluating gas pipeline residual service life by fatigue strength Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V.
- 75 Diagnosis of vertical steel tanks as a tool to improve safety operation of oil and gas facilities Fedosov A.V., Abdrakhmanov N.Kh., Vadulina N.V., Khafizova D.F., Abdrakhmanova K.N.
- 82 Research of array geodynamics in the interface of cleaning and preparatory works Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M., Stas G.V.
- **91** Estimation of the benzo(a)pyrene effect on biological activity of the Rostov Region chernozem Minnikova T.V., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Kolesnikov S.I.
 - Dependence of an electric-centrifugal pump heat state on engine rotation frequency Saracheva D.A., Vakhitova R.I., Urazakov K.R.
 - Prediction of heavy oil biodegradation by association of aboriginal petrodestructive microorganisms
 Safarov A.H., Vodopyanov V.V., Yagafarova G.G., Dusaeva I.M., Akchurina L.R.
 - 9 Electromagnetic drying of wet materials with a small depth of penetration of microwave radiation in the conditions of heat removal by radiation and convection. II. Stage of constant drying speed Salomatov V.V., Karelin V.A., Salomatov V.V.
- 126 Characteristic of mud inrushes distribution from caved zone into deposit located under sedimentary structure Efremov E.Yu.

- скорость бурения и образование поломок режущих on drilling speed and formation of breakdowns элементов буровых долот, армированных PDC Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. Tretyak A.A., Litkevich Yu.F., Borisov K.A. Soliton solution Солитонное решение электромеханических 142 переходных процессов в энергосистемах, of electromechanical transient processes in electric power systems снабжающих нефтяные и газовые месторождения Исаев Ю.Н., Колчанова В.А., Кулешова Е.О., Филипас А.А. Reducing dimension of spatio-temporal models Снижение размерности пространственно-временных 151 моделей нелинейных динамических процессов of nonlinear dynamic processes обогащения железорудного сырья of iron ore raw materials enrichment Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В., Грищенко С.Н., Суворов А.И., Паранюк Д.И., Сердюк А.Ю. Частотно-регулируемый электропривод Variable speed electric drive of centrifugal pump 168 центробежных насосных установок добычи нефти in oil lifting plants Chernysheva T.A., Anikin V.V., Chernyshev I.A., Chernyshev A.Yu. Чернышева Т.А., Аникин В.В., Чернышев И.А., Чернышев А.Ю. Корреляционный анализ основных границ осадочного Correlation analysis of the main boundaries 179 чехла Северо-Устюртского региона Абетов А.Е., Волож Ю.А., Ниязова А.Т.
- Развитие метода люминесцентного контроля состава 189 плазмы и обрабатываемой поверхности в технологии антикоррозионной защиты нефтегазового оборудования

Влияние крутильных и продольных колебаний на 135

Тюрин Ю.И., Ван Яомин, Сыпченко В.С., Никитенков А.Н.

of cutting elements of PDC-reinforced drill bits

Influence of torsional and longitudinal vibrations

Isaev Yu.N., Kolchanova V.A., Kuleshova E.O., Filipas A.A.

- Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Hryshchenko S.M., Suvorov O.I., Paraniuk D.I., Serdiuk O.J.
- of a sedimentary cover of the North-Ustyurt region Abetov A.E., Volozh Yu.A., Niyazova A.T.
- Method of fluorescent control of plasma structure and treated surface in technique of downhole equipment anticorrosion protection Tyurin Yu.I., Wang Yaoming, Sypchenko V.S., Niktenkov A.N.

УДК 553.78

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УСТОЙЧИВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХАНКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Фархутдинов Анвар Мансурович¹,

anvarfarh@mail.ru

Фархутдинов Исхак Мансурович¹,

iskhakgeo@gmail.com

Черкасов Сергей Владимирович²,

sergy@sgm.ru

Исмагилов Рустем Айратович^{3,1},

rustem ismagilov@bk.ru

Хайрулина Лариса Александровна¹,

artthemix@mail.ru

- ¹ Башкирский государственный университет, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.
- ² Государственный геологическийо музей им. В.И. Вернадского, Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 11.
- ³ Институт геологии УФИЦ РАН, Россия, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью достижения устойчивости в эксплуатации термальных подземных вод. Снижение температуры геотермального резервуара при обратной закачке использованного флюида является важнейшей проблемой долгосрочной эксплуатации, прогноз которой возможен с помощью компьютерного моделирования.

Цель: дать прогноз изменения температурного режима в ходе эксплуатации Ханкальского месторождения, рассмотреть различные сценарии разработки и предложить возможные решения достижения устойчивости в разработке месторождения.

Объекты: Ханкальское месторождение; дублетная циркуляционная система Ханкальской геотермальной станции.

Методы: компьютерное моделирование изменения температуры ресурса термальных подземных вод; оценка и анализ возможных вариантов периодической эксплуатации месторождения; оценка суммарной выработки тепла и конечной темпертуры геотермального резервуара на момент остановки для различных вариантов эксплуатации.

Результаты. На Ханкальском месторождении снижение температуры в продуктивной скважине начнется через 6–7 лет после разработки в запланированном режиме. Периодическая короткая эксплуатация и остановка (10-летний цикл, 100 лет суммарно) позволяют выработать больше тепла по сравнению с более продолжительной эксплуатацией (50-летний цикл, 100 лет суммарно), вместе с тем второй вариант дает возможность достичь более высокого восстановления температуры в продуктивной скважине. В случае значительного снижения температуры после некоторого периода эксплуатации XIII пласта предлагается периодическое использование различных продуктивных горизонтов (IV–VII, XVI или XXII) для обеспечения устойчивости работы геотермальной станции. Разработка XIII пласта возможна после периода остановки благодаря относительно высокой скорости восстановления температуры. Следует размещать скважины параллельно двум главным разломам Ханкальского месторождения, при этом продуктивную с в северной части, так как естественный поток подземных вод может замедлить расширение холодного фронта до продуктивной скважины. Установка и периодическое использование двух идио фронта до продуктивной скважины. Установка и периодическое использование двух изми, в и после периода останови и благодаря относительно высокой скорости восстановния температуры. Следует размещать скважины параллельно двум главным разломам Ханкальского месторождения, при этом продуктивную с в северной части, так как естественный поток подземных вод может замедлить расширение холодного фронта до продуктивной скважины. Установка и периодическое использование двух или нальность наибольшую устойчивость при долгосрочной эксплуатации. Однако рацио нальность этого метора, требующего больших дополнительных затрат на начальном этапе реализации проекта, представляет собой сложный вопрос. Выбор режима эксплуатации требует учета гидрогеологических, сеотермальных, экономических и технических аспектов при совместном участии гидрогеологов, специалистов по геотермии, технологов и экономистов.

Ключевые слова:

Возобновляемые ресурсы энергии, термальные подземные воды, устойчивая эксплуатация, дублет, моделирование, Ханкальское месторождение.

Введение

Значительное внимание в последние годы уделяется возобновляемым источникам энергии, использование которых считается одним из показателей развития страны. Важное значение среди них имеют термальные подземные воды. Несмотря на то, что в России использование термальных вод экономически уступает эксплуатации газовых и угольных станций [1], экологическая чистота и возобновляемость делает их применение перспективным [2]. Возобновляемость характеризуется тем, что «энергия, извлекаемая из возобновляемого источника, всегда естественным образом восполняется дополнительным количеством энергии, и замена происходит в аналогичном масштабе времени, что и извлечение» [3]. В то же время ресурс термальных подземных вод может быть исчерпан в результате чрезмерной эксплуатации. Залогом достижения устойчивости в эксплуатации является мониторинг [4] и рациональный режим разработки, который подразумевает поддержание баланса в извлечении и восстановлении ресурса. Для симуляции поведения сложной геотермальной системы при различных условиях разработки используется математическое моделирование, что позволяет решать проблему устойчивости эксплуатации [5–12].

Компьютерное моделирование в этой отрасли началось с 1970-х гг., когда создание крупных гидротехнических сооружений и эксплуатация месторождений подземных вод определили необходимость гидрогеологических прогнозов и развития теории динамики подземных вод [13]. Разработано множество программ для моделирования тепломассопереноса в системах водоносных горизонтов (FEFLOW [14], MODFLOW [15], Metis [16], Comsol, Tough2 [17], Marthe [18], Opengeosys [19] и др.). Они дают возможность спрогнозировать и выбрать правильный режим эксплуатации геотермальных ресурсов, в частности, для учета эффекта обратной закачки. В настоящей статье математическое моделирование применяется для прогноза изменения температурного режима и разработки рекомендаций по эксплуатации термальных вод Ханкальского месторождения.

Материалы и методы

Ханкальское месторождение термальных подземных вод

Месторождение расположено в Чеченской Республике, в 10 км к юго-востоку от г. Грозного (рис. 1).

Территория относится к Восточно-Предкавказскому артезианскому бассейну площадью около 250 тыс. км² [20]. Термальные воды содержатся в многопластовой системе караган-чокракских отложений среднего миоцена, где выделяются до 22 продуктивных пластов, разделенных глинистыми прослойками. Зона питания расположена на юге Чеченской Республики, после инфильтрации воды движутся в северном направлении (рис. 2).

Факторами формирования геотермальных ресурсов данной территории являются высокие значения теплового потока, движение подземных вод и структурно-тектонические особенности (нагрев



Puc. 1. Расположение Ханкальского месторождения Fig. 1. Location of the Khankala field



Рис. 2. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн – схематическая карта по И.Ю. Дежниковой с изменениями [2015] [21]. Условные обозначения: 1 – госграница, 2 – границы гидрогеологических структур, 3 – граница Чеченской Республики, 4 – выходы караган-чокракских отложений на поверхность, 5 – месторождения термальных подземных вод; I–V артезианские бассейны: I – Восточно-Предкавказский, II – Кавказская гидрогеологическая складчатая область, III – Азово-Кубанский, IV – Ергенинский, V – Прикаспийский

Fig. 2. East Ciscaucasian Artesian Basin – schematic map after I.U. Dezhnikova with modifications [2015] [21]. Legend: 1 is the state border, 2 is hydrogeological structures border, 3 is the border of the Chechen Republic, 4 are the Karagan-Chokrak deposits outcrops, 5 are the geothermal fields; I–V artesian basins: I – the East Ciscaucasian, II – the Caucasian hydrogeological folded region, III – the Azov-Kuban, IV – the Ergeninsky, V – the Caspian

воды в синклинальных прогибах, а затем ее подъем на поверхность), а также литология горных пород – продуктивные пласты заключены между глинами сармата и майкопа, которые способствуют сохранению тепла [22].

Территория месторождения ограничена двумя разломами (рис. 3).

В начале 2016 г. на базе наиболее перспективного XIII продуктивного пласта была запущена геотермальная станция. Мощность объекта составляет 22,8 ГДж/час с парниковым комплексом в качестве потребителя [23]. Эксплуатация проводится с применением «дублета» (рис. 4), состоящего из продуктивной и нагнетательной скважин с полной обратной закачкой использованного флюида. Температура получаемой воды составляет 95 °C, обратной закачки равна 45 °C [24].

Обратная закачка использованной жидкости позволяет минимизировать возможное отрицательное воздействие на окружающую среду, а также поддерживать пластовое давление и, следовательно, высокие дебиты. Однако у данного метода есть главный недостаток – снижение температуры в водоносном горизонте, для прогноза которого применяется компьютерное моделирование.

Компьютерное моделирование

Компьютерная программа Metis [16] моделирует поток подземных вод и тепломассоперенос в пористых или трещинных водоносных горизонтах. Перед моделированием определяется геометрия, параметры системы, а также начальные и граничные условия с использованием распределения температуры и структурной карты XIII пласта, полученных после геостатистической оценки [25]. Кроме того, привлекались фондовые данные, в том числе результаты испытаний скважин, некоторые теплофизические параметры, а также средние значения теплопроводности и теплоемкости различных типов пород из литературных источников [26] (табл. 1).

Граничные условия (рис. 5):

- нагнетание воды 200 м³/ч 7 месяцев в году (отопительный период) с постоянным потоком тепла 10051 Мватт (отвечает температуре обратной закачки 45 °C);
- тепловой поток от основания модели равный 82 мВт/м² (по М.К. Курбанову [20]).
- постоянный напор на границах сетки для создания регионального потока подземных вод либо непроницаемые границы на основных двух разломах.



Рис. 3. Трехмерная геологическая модель Ханкальского месторождения

Fig. 3. Khankala field 3D geological model



Рис. 4. «Дублетная» циркуляционная система Ханкальского месторождения

Fig. 4. Khankala field «doublet» circulation system

	112000000000								
Глубина залегания, м Depth, m		Мощость, м	Геологический разрез	Теплопровод- ность, Вт/(м·°С)		Объемная теплоем- кость, МДж/м ³ /°С		Проница- емость, м ²	Коэффициент упругой
от (верх) from (top)	до (низ) to (bottom)	Thick- ness, m	Geological section	Thermal of tivity, W	conduc- /(m·°C)	Volume capacity,	tric heat MJ/m³/°C	Permeabi- lity, m ²	емкости, м ⁻¹ Storativity, m ⁻¹
0	35	35	Четвертичные отложения Quaternery sediments	2,1		2,1			
35	700	665	Сарматские отложения Sarmatian sediments	1,4	1,53	2,2	2,23	-	-
700	843	143	Караганские отложения (до XIII пласта) Karagan sediments (above the XIII layer)	2		2,4			
843	890	47	XIII продуктивный пласт XIII productive layer	2,3	2,3	2,486	2,486	6.77e-13	5e-6
890	1290	400	Караган-чокракские отложения (после XIII пласта) Karagan-Chokrak sediments (below the XIII layer)	1,8	1,5	2,4	2,28	-	_
1290	2500	1210	Майкопские отложения Maikon sediments	1,4		2,25			

 Таблица 1.
 Начальные параметры моделирования

 Table 1.
 Modelling initial conditions



Рис. 5. Схематическое изображение модели дублета. Красные и синие стрелки указывают направление теплового потока и естественного движения подземных вод, соответственно

Fig. 5. Schematic representation of the doublet model. Red and blue arrows indicate the direction of heat flow and natural groundwater movement, respectively

Процессы переноса жидкости и тепла связаны: на каждом этапе программа производит поочередное решение уравнений методом конечных элементов.

Результаты

Для оценки возможного влияния двух главных разломов Ханкальского месторождения рассматривались две различные гипотезы, одна – с учетом естественного регионального движения подземных вод, другая – с учетом их непроницаемости.

Результаты моделирования сравнивались с аналитическим решением изменения температуры «дублета» [27]. Для аналитического решения был установлен усредненный постоянный дебит равный 117 м³/ч (рис. 6, табл. 2).

Таблица 2.Результаты моделированияTable 2.Modeling results

Условие Condition	$\Delta T=1$ °С, лет $\Delta T=1$ °С, years	Δ <i>T</i> , °C (50 лет) Δ <i>T</i> , °C (50 years)
Непроницаемые разломы Impermeable faults	7,56	-20,74
Естественный поток подземных вод Natural groundwater flow	10,1	-12
Аналитическое решение Analytical solution	6,3	-24,07

«Тепловой прорыв» происходит раньше, и температура уменьшается быстрее в случае аналитического решения (аналогичные результаты были получены с помощью 2D моделирования в программе Metis с однородным распределением температуры



Рис. 6. Результаты моделирования: изменение температуры на эксплуатационной скважине

Fig. 6. Modeling results: production well temperature change



Рис. 7. Результаты моделирования: изменение температуры в XIII пласте

Fig. 7. Modeling results: the XIII layer temperature change

(рис. 6)), так как температура продуктивного пласта и окружающих пород одинакова. В случае же 3D моделирования температура получена после геостатистической оценки и распределена неравномерно с более высокими значениями глубже и к югу от эксплуатационной скважины (рис. 7).

Дальнейшее исследование посвящено моделированию восстановления ресурса продуктивного пласта. Рассматривались различные возможные сценарии эксплуатации: постоянная эксплуатация и чередование разработки и остановки с циклами в 10, 25 и 50 лет (100 лет суммарно) (рис. 8).

Общее количество возможной выработки тепла рассчитывалось по формуле [28], адаптированной для установки «дублетных» циркуляционных систем (табл. 3):

$$G = 10^{-3} Q \eta C (t_{\text{добычи}} - t_{\text{закачки}}),$$

где G – тепловые ресурсы, ГДж/сутки; Q – дебит, м³/сутки; $t_{\text{добычн}}$ – температура добываемой воды, °С;



Puc. 8. Результаты моделирования: изменение температуры в эксплуатационной скважине для различных сценариев эксплуатации Fig. 8. Modeling results: production well temperature change in case of different exploitation scenarios



Рис. 9. Температурный профиль на продуктивной скважине после 100 лет эксплуатации

Fig. 9. Temperature section at the production well after 100 years of exploitation

 $t_{\text{закачки}}$ – температура закачиваемой воды, 45 °C; C – удельная теплоемкость воды (4,186 кДж/кг·°С); η – эффективность теплообменника 0,9.

 Таблица 3.
 Различные варианты эксплуатации XIII пласта

 Table 3.
 XIII layer different exploitation scenarios

Схема эксплуатации- остановки (лет) Exploitation-stoppage scheme (years)	Рассматриваемый период, лет Considered period, years	Производство энергии, тыс. ГДж Energy production, thous. GJ	Минимальная темпера- тура производства, °C Minimal energy produc- tion temperature, °C	Конечная температура производства, °C Final energy production temperature, °C	Восстановление коллектора, % Reservoir recovery, %	
10×10	100 625,7		85,4	92,5	69,0	
4×25	100 612,4		83,3	94,4	89,4	
2×50	100	588,3	82,4	95,4	97,2	

10-летний цикл эксплуатации-остановки позволяет выработать больше тепла, так как температура получаемой воды остается на более высоком уровне. В то же время самое высокое восстановление температуры происходит при наиболее продолжительном цикле эксплуатации-остановки. Это объясняется тем, что с увеличением продолжительности добычи возрастает разность температур в резервуаре, что приводит к более сильному температурному компенсационному притоку тепла [29] (рис. 9).

Заключение

Геотермальная энергия обладает огромным потенциалом для будущего обеспечения электричеством и теплом, имеет высокую доступность и распространненность. Энергия термальных вод является возобновляемой с низким (вплоть до нулевых значений) выбросом загрязняющих веществ при использовании. Одним из ключевых моментов разработки является вопрос устойчивости, при решении которого важен мониторинт и рациональный режим эксплуатации.

Исходя из результатов моделирования, снижение температуры воды продуктивной скважины Ханкальского месторождения начнется через 6–7 лет с начала разработки и является лишь вопросом времени. В то же время достижение устойчивости разработки и «неисчерпаемости» ресурса возможно с применением адекватной стратегии: «...для каждой геотермальной системы и для каждого способа эксплуатации существует определенный уровень максимального производства энергии, ниже которого можно будет поддерживать постоянное производство энергии из системы в течение очень долгого времени (100–300 лет)...» [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Одним из основных преимуществ Ханкальского месторождения является наличие многопластовой системы. Вертикальное расширение «холодного фронта» ограничено непроницаемыми глинистыми прослоями, поэтому обратная закачка в один из продуктивных пластов не снижает температуру в других. В случае значительного снижения температуры в ходе разработки XIII пласта существует возможность пробурить новый «дублет» на той же территории на ресурс наиболее перспективных пластов IV-VII, XVI или XXII, что позволит геотермальной станции продолжить работу. Ресурс XIII пласта можно использовать снова после периода остановки с учетом относительно высокой скорости восстановления температуры. В перспективе возможно периодическое использование различных пластов.

Следует подчеркнуть важность размещения скважин параллельно двум главным разломам, при этом продуктивную скважину – в южной, нагнетательную – в северной части, поскольку естественное движение подземных вод способно замедлить расширение холодного фронта до продуктивной скважины.

Установка и периодическое использование двух или более циркуляционных систем могут быть наиболее оптимальным решением проблемы устойчивости при долгосрочной эксплуатации. Однако рациональность этого метода, требующего больших дополнительных затрат на начальном этапе его реализации (бурение составляет от 30 до 50 % стоимости геотермального проекта [30]), представляет собой довольно сложный вопрос. Помимо гидрогеологических и геотермальных аспектов, следует учитывать экономические и технические особенности различных вариантов эксплуатации месторождений, то есть необходимо сотрудничество гидрогеологов, специалистов геотермии, технологов и экономистов.

Результаты моделирования показывают, что долгосрочное использование геотермальных вод на месторождении возможно, но адекватный сценарий эксплуатации требует всестороннего анализа этой проблемы. Адаптированные методы математического моделирования в дальнейшем могут быть использованы при обосновании условий эксплуатации других месторождений, а освоение экологически чистых геотермальных вод будет значительным вкладом в производство энергии и может изменить традиционные схемы энергоснабжения в ряде регионов России.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00357.

литехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 50–61.

Термальные подземные воды Восточно-Предкавказского артезианского бассейна: экономические аспекты использования на примере Ханкальского месторождения / А.М. Фархутдинов, И.Ш. Хамитов, С.В. Черкасов, М.Ш. Минцаев, Ш.Ш. Заурбеков, А.А. Шаипов, М.М. Лабазанов // Известия Томского по-

The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation / S.V. Cherkasov, T.G. Churikova, L.R. Bekmurzaeva, B.N. Gordeichik, A.M. Farkhutdinov // Ecology, Environment and Conservation. – 2015. – V. 21. – Suppl. Issue. – P. 67–77.

- Sustainable production of geothermal energy: suggested definition / G. Axelsson, A. Gudmundsson, B. Steingrimsson, G. Palmason, H. Armannsson, H. Tulinius, O.G. Flovenz, S. Bjornsson, V. Stefansson // IGA-News. - 2001. - № 43. - P. 1-2.
- Cherkasov S.V., Farkhutdinov A.M., Rykovanov D.P., Shaipov A.A. The Use of Unmanned Aerial Vehicle for Geothermal Exploitation Monitoring: Khankala Field Example // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. - 2018. - № 6 (2). - P. 351-362.
- Antics M., Papachristou M., Ungemach P. Sustainable heat mining. A reservoir engineering approach // Proc. of the 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Stanford, California: Stanford University, January 31 – February 2, 2005. – 14 p.
- Ungemach P., Antics M., Papachristou M. Sustainable Geothermal Reservoir Management // World Geothermal Congress. – Turkey, 24-29 April 2005. – 12 p.
- Ungemach P., Papachristou M., Antics M. Renewability versus Sustainability. A Reservoir Management Approach // European Geothermal Conference. – Unterhaching, Germany, 30 May – 1 June 2007. – 13 p.
- Ungemach P., Antics M., Lalos P. Sustainable geothermal reservoir management a modelling suite // Proc. of Australian Geothermal Energy Conference. Melbourne, Geoscience Australia, 16–18 November 2011. P. 267–275.
- Shortall R., Davidsdottir B., Axelsson G. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2015. - № 44. - P. 391-406.
- 10. Axelsson G. Sustainable management of geothermal resources // SDG Short Course I on Sustainability and Environmental Management of Geothermal Resource Utilization and the Role of Geothermal in Combating Climate Change, UNU-GTP and LaGeo. Santa Tecla, El Salvador, 2016. – 15 p.
- Integrated research as key to the development of a sustainable geothermal energy technology / C. Meller, J. Bremer, S. Baur, T. Bergfeldt, P. Blum, T. Canic et al. // Energy Technology. – 2017. – № 5 (7). – P. 965–1006.
- Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization / J. Limberger, T. Boxemb, M. Pluymaekers, D. Bruhn, A. Manzella, P. Calcagno, F. Beekman, S. Cloetingh, J.-D. van Wees // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2018. - № 82. - P. 961-975.
- Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии. 2-е. изд. М.: Изд-во МГУ, 2007. – 448 с.
- Diersch H.-J.G. FEFLOW Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. – Springer, Berlin Heidelberg, 2014. – 996 p. DOI: 10.1007/978–3-642–38739–5.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Open-File Report 83-875. - U.S. Geological Survey, 1983.
- Goblet P. Modélisation des transferts de masse et d'énergie en aquifère: PhD Thesis. – Paris, France, 1980. – 200 p.

- Pruess K. Mathematical modelling of fluid flow and heat transfer in geothermal systems. An introduction in five lectures. Berkeley National Laboratory Report LBNL-51295. -Berkeley, CA, 2002. -84 p.
- Thiéry D. Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid 158 in Transient state for Hydrodynamic calculations of heads and flows. Release 4.3. Report 4S/EAU n° R32548. - BRGM, 1990.
- OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media / O. Kolditz, S. Bauer, L. Bilke, N. Böttcher, J.O. Delfs, T. Fischer et al. // Environmental Earth Sciences. – 2012. – № 67 (2). – P. 589–599.
- Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. – М.: Наука, 2001. – 260 с.
- Дежникова И.Ю. Карта запасов подземных вод и степени их освоения по гидрогеологическим структурам территории Российской Федерации. – 2015. URL: http://www.geomonitoring.ru/ (дата обращения: 26.12.2018).
- Алхасов А.Б. Возобновляемые источники энергии. М.: МЭИ, 2011. – 270 с.
- Farkhutdinov A., Goblet P., Fouquet de C., Cherkasov S. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters // Geothermics. – 2016. – V. 59. – P. 56–66. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.005. (дата обращения: 26.12.2018).
- Farkhutdinov A.M., Goblet P., Cherkasov S.V. Computer modelling in geothermal waters reservoirs exploitation on the example of the Khankala deposit // Ecology, Environment and Conservation. - 2015. - V. 21. -Suppl. Issue. - P. 87-91.
- 25. The use of computer modelling to forecast the sustainability in the development of geothermal waters resource: Khankala deposit example / A. Farkhutdinov, P. Goblet, C. de Fouquet, R. Ismagilov, I. Farkhutdinov, S. Cherkasov // International Journal of Renewable Energy Research. 2015. V. 5. № 4. P. 1062–1068.
- 26. Marsily G. Hydrogéologie quantitative. Paris: Masson, 1981. 215 p.
- 27. Gringarten A.C., Sauty J.P. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow // Journal of Geophysical Research. 1975. № 35. P. 4956-4962.
- Ресурсы термальных вод СССР / под ред. С.С. Бондаренко. М.: Наука, 1975. – 240 с.
- Megel T., Rybach L. Production capacity and sustainability of geothermal doublets // Proc. World Geothermal Congress. – Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000. – P. 859–854.
- Dumas P., Antics M., Ungemach P. GeoELEC Report on Geothermal Drilling / Geoelec. 2011. 36 p. URL: http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2011/09/D-3.3-GEOELEC-report-on-drilling.pdf (дата обращения: 26.12.2018).

Поступила 15.01.2019 г.

Информация об авторах

Фархутдинов А.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и полезных ископаемых географического факультета Башкирского государственного университета.

Фархутдинов И.М., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и полезных ископаемых географического факультета Башкирского государственного университета.

Черкасов С.В., кандидат геолого-минералогических наук, директор Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского.

Исмагилов Р.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии УФИЦ РАН; доцент кафедры геофизики Башкирского государственного университета.

Хайрулина Л.А., старший преподаватель кафедры геологии и полезных ископаемых географического факультета Башкирского государственного университета. UDC 553.78

USE OF COMPUTER MODELLING FOR THE KHANKALA GEOTHERMAL WATERS SUSTAINABLE EXPLOITATION

Anvar M. Farkhutdinov¹,

anvarfarh@mail.ru

Iskhak M. Farkhutdinov¹, iskhakgeo@gmail.com

Sergey V. Cherkasov², sergy@sgm.ru

Rustem A. Ismagilov^{3,1}, rustem ismagilov@bk.ru

Larisa A. Khairulina¹,

artthemix@mail.ru

- Bashkir State University,32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia.
- ² Vernadsky State Geological Museum, 11/11, Mokhovaya street, Moscow, 125009, Russia.
- ³ Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, 16/2, Karl Marx street, Ufa, 450077, Russia

The relevance of the research is caused by the need of achieving sustainability in exploitation of geothermal waters. Temperature drop of geothermal reservoir during the re-injection of used fluid is the most important problem of long-term operation, the forecast of which is possible with the help of computer modelling.

The main aim of the research is to forecast the temperature changes during the Khankala field exploitation, consider various development scenarios and propose possible solutions to achieve sustainability in field operation.

Objects of the research are the Khankala field; doublet circulation system of the Khankala geothermal station.

Methods: computer modelling of temperature changes of the geothermal resource; assessment and analysis of possible variants for periodic exploitation of the field; calculation of the total heat generation and the final temperature of the geothermal reservoir at the time of shutdown for various operating options.

Results. Temperature drop in a production well will start after 6–7 years of exploitaion in the planned mode at the Khankala field. Periodic short-term operation and shutdown (10-year cycle, 100 years in total) allows more heat to be generated compared with longer operation (50-year cycle, 100 years in total), while the second variant makes it possible to achieve a higher temperature recovery in the production well. In the case of a significant decrease in temperature after a certain period of the XIII layer exploitation, periodic use of various productive layers (IV–VII, XVI or XXII) is proposed to ensure the sustainability of the geothermal station. Development of the XIII layer is possible after a period of stopping due to the relatively high rate of temperature recovery. Wells should be placed parallel to the two main faults of the Khankala field, with the production well in the south and the injection well in the northern part, since the natural flow of groundwater can slow down the expansion of the cold front to the production well. The installation and periodic use of two or more circulation systems can provide the greatest stability in long-term operation. However, the rationality of this method, which requires large additional costs at the initial stage of project implementation, is a complex issue. The choice of operating mode requires consideration of hydrogeological, geothermal, economic and technical aspects with the joint participation of hydrogeologists, geothermal specialists, technologists and economists.

Key words:

Renewable energy resources, geothermal waters, sustainable exploitation, doublet, modelling, Khankala field.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18–35–00357.

REFERENCES

- Farkhutdinov A.M., Khamitov I.Sh., Cherkasov S.V., Mintsaev M.Sh., Zaurbekov Sh.Sh., Shaipov A.A., Labazanov M.M. Geothermal waters of East-Ciscausasian Artesian Basin: economical aspects of using by the example of Khankala deposit, *Bulletin* of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no 1, pp. 50–61.
- Cherkasov S.V., Churikova T.G., Bekmurzaeva L.R., Gordeichik B.N., Farkhutdinov A.M. The state and prospects for the

utilization of geothermal resources in the Russian Federation, *Ecology, Environment and Conservation*, 2015, vol. 21, Suppl. Issue, pp. 67–77.

- Axelsson G., Gudmundsson A., Steingrimsson B., Palmason G., Armannsson H., Tulinius H., Flovenz O.G., Bjornsson S., Stefansson V. Sustainable production of geothermal energy: suggested definition. *IGA*-News, 2001, no. 43, pp. 1–2.
- 4. Cherkasov S.V., Farkhutdinov A.M., Rykovanov D.P., Shaipov A.A. The Use of Unmanned Aerial Vehicle for Geothermal

Exploitation Monitoring: Khankala Field Example, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2018, no. 6 (2), pp. 351–362.

- Antics M., Papachristou M., Ungemach P. Sustainable heat mining. A reservoir engineering approach, Proc. of the 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, Stanford University, January 31 February 2, 2005. 14 p.
- Ungemach P., Antics M., Papachristou M. Sustainable Geothermal Reservoir Management. World Geothermal Congress. Turkey, 24-29 April 2005. 12 p.
- Ungemach P., Papachristou M., Antics M. Renewability versus sustainability. A reservoir management approach. *European Geothermal Conference*. Unterhaching, Germany, 30 May – 1 June 2007. 13 p.
- Ungemach P., Antics M., Lalos P. Sustainable geothermal reservoir management a modelling suite. Proc. of Australian Geothermal Energy Conference. Melbourne, Geoscience Australia, 16–18 November 2011. pp. 267–275.
- Shortall R., Davidsdottir B., Axelsson G. Geothermal energy for sustainable development: a review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Re*views, 2015, no. 44, pp. 391-406.
- Axelsson G. Sustainable management of geothermal resources. SDG Short Course I on Sustainability and Environmental Management of Geothermal Resource Utilization and the Role of Geothermal in Combating Climate Change. UNU-GTP and LaGeo. Santa Tecla, El Salvador, 2016. 15 p.
- Meller C., Bremer J., Baur S., Bergfeldt T., Blum P., Canic T. Integrated research as key to the development of a sustainable geothermal energy technology. *Energy Technology*, 2017, no. 5 (7), pp. 965-1006.
- Limberger J., Boxemb T., Pluymaekers M., Bruhn D., Manzella A., Calcagno P., Beekman F., Cloetingh S., Van Wees J.-D. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, no. 82, pp. 961–975.
- Vsevolozhsky V.A. Osnovy gidrogeologii [Fundamentals of hydrogeology]. Moscow, MSU Publ., 2007. 448 p.
- Diersch H.-J.G. FEFLOW Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Berlin Heidelberg, Springer, 2014. 996 p. DOI: 10.1007/978–3-642–38739–5.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Open-File Report 83-875. U.S. Geological Survey, 1983.
- 16. Goblet P. Modélisation des transferts de masse et d'énergie en aquifère [Modelling mass and energy transfers in aquifers]. PhD Thesis. Paris, France, 1980. 200 p.
- Pruess K. Mathematical modelling of fluid flow and heat transfer in geothermal systems. An introduction in five lectures. Berkeley National Laboratory Report LBNL-51295. Berkeley, CA, 2002. 84 p.

- Thiéry D. Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid 158 in Transient state for Hydrodynamic calculations of heads and flows. Release 4.3. Report 4S/EAU n° R32548. BRGM, 1990.
- Kolditz O., Bauer S., Bilke L., Böttcher N., Delfs J.O., Fischer T. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, 2012, no. 67 (2), pp. 589–599.
- Kurbanov M.K. Geotermalnye i gidromineralnye resursy Vostochnogo Kavkaza i Predkavkazya [Geothermal and hydromineral resources of the Eastern Caucasus and Ciscaucasia]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 260 p.
- Dezhnikova I.Yu. Karta zapasov podzemnykh vod i stepeni ikh osvoeniya po gidrogeologicheskim strukturam territorii Rossiyskoy Federatsii [Map of groundwater reserves and degree of their development by hydrogeological structures of the territory of the Russian Federation]. 2015. Available at: http://www.geomonitoring.ru/ (accessed 26 December 2018).
- Alkhasov A.B. Vozobnovlyaemye istochniki energii [Renewable energy sources]. Moscow, MEI Publ., 2011. 270 p.
- Farkhutdinov A., Goblet P., Fouquet de C., Cherkasov S. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters. *Geothermics*, 2016, vol. 59, pp. 56-66. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.005 (accessed 26 December 2018).
- Farkhutdinov A.M., Goblet P., Cherkasov S.V. Computer modelling in geothermal waters reservoirs exploitation on the example of the Khankala deposit. *Ecology, Environment and Conservation*, 2015, vol. 21, Suppl. Issue, pp. 87–91.
- 25. Farkhutdinov A., Goblet P., de Fouquet C., Ismagilov R., Farkhutdinov I., Cherkasov S. The use of computer modelling to forecast the sustainability in the development of geothermal waters resource: Khankala Deposit Example. *International Journal* of Renewable Energy Research, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 1062-1068.
- Marsily G. Hydrogéologie quantitative [Quantitative hydrogeology]. Paris, Masson, 1981. 215 p.
- Gringarten A.C., Sauty J.P. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. *Journal of Ge*ophysical Research, 1975, no. 35, pp. 4956-4962.
- Resursy termalnykh vod SSSR [Resources of geothermal waters of the USSR]. Ed. by S.S. Bondarenko. Moscow, Nauka Publ., 1975. 240 p.
- Megel T., Rybach L. Production capacity and sustainability of geothermal doublets. *Proc. World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000. pp. 859–854.
- Dumas P., Antics M., Ungemach P. GeoELEC Report on Geothermal Drilling. Geoelec. 2011, 36 p. Available at: http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2011/09/D-3.3-GEOELEC-report-on-drilling.pdf (accessed 26 December 2018).

Received: 15 January 2019.

Information about the authors

Anvar M. Farkhutdinov, Cand. Sc., associate professor, Bashkir State University.

Iskhak M. Farkhutdinov, Cand. Sc., associate professor, Bashkir State University.

Sergey V. Cherkasov, Cand. Sc., director, Vernadsky State Geological Museum.

Rustem A. Ismagilov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of Russian Academy of Sciences; associate professor, Bashkir State University.

Larisa A. Khairulina, assistant professor, Bashkir State University.

УДК 622.24.051.64

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Попова Марина Сергеевна¹,

alleniram83@mail.ru

Харитонов Антон Юрьевич²,

donetskant@yandex.ru

- ¹ Сибирский федеральный университет, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.
- ² LabVIEW-разработчик, Norway, Moi, 4460, Moiveien, 2.

Актуальность. Основным направлением развития бурения скважин является повышение технико-экономических показателей и разработка нового поколения породоразрушающего инструмента, обеспечивающего эффективное разрушение горной породы. Для повышения технико-экономических показателей бурения необходимо изучение процессов, протекающих при бурении скважин. Зачастую они носят сложный характер и нуждаются в детализации в мелких труднодоступных местах призабойной зоны. В некоторых случаях экспериментальные методы исследования затруднительны, требуют материальных затрат или вовсе недоступны. К тому же основным современным требованием к научным исследованиям является комплексный подход, который заключается во всестороннем и одновременном рассмотрении всех процессов, протекающих при бурении скважины. В связи с этим применение компьютерного моделирования является актуальным методом, позволяющим точно, наглядно и достоверно проводить исследования процессов бурения.

Цель: компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин.

Объекты: процессы, протекающие при бурении скважин.

Методы: имитационное моделирование, аналитические исследования, анализ.

Результаты. Определены основные процессы бурения, которые необходимо исследовать при проектировании и разработке нового поколения породоразрушающего инструмента. Рассмотрены возможности компьютерного моделирования при исследовании процессов бурения алмазными коронками. На примере упрощенной модели взаимодействия породоразрушающего инструмента с горной породой приведены программные продукты и такие результаты их применения, как толщина слоя породы, снимаемая любым алмазом коронки, координаты местонахождения инструмента в любой момент времени, температура нагрева алмазной однослойной коронки, распределение механических напряжений в породоразрушающем инструменте колонкового бурения. Осуществлено сравнение моделирования одних и тех же процессов бурения с применением различных программных программных продуктов. Выявлены особенности и точность моделирования процессов бурения. Обосновано использование компьютерного моделирования над экспериментом.

Ключевые слова:

Компьютерное моделирование, бурение, породоразрушающий инструмент, программирование, параметрическая модель, раскладка алмазов, буровая коронка.

Введение

В эпоху экономии и борьбы за энергетические ресурсы бурение как способ разведки и добычи полезного ископаемого приобретает решающее значение в развитии мировой экономики. Повышенные требования к технико-экономическим показателям бурения предполагают использование комплексного подхода в научном исследовании буровых процессов [1]. Бурение скважин как модель является сложной системой, состоящей из механических, химических, гидравлических, температурных явлений. Некоторые элементы бурения для достоверности результатов необходимо изучать на микроуровне. Таким образом, исследование процессов бурения является сложной задачей и решение ее привычными методами не всегда остается возможным. Наиболее перспективным в этом направлении является компьютерное моделирование, способное максимально приблизить модель исследования к реальным условиям, сократить время и затраты на разработку инструмента, анализ процессов бурения, визуализировать полученный результат [2].

Современные разработчики бурового инструмента все чаще пользуются общедоступными компьютерными технологиями инженерного проектирования, а также разрабатывают собственные продукты, например, Ideas, Smith Bits с успехом применили компьютерное моделирование в своих разработках. Наиболее популярными в области исследования буровых процессов на сегодняшний день являются САЕ (Computer Aided Engineering) системы, основанные на методе конечных элементов, такие как Nastran, Patran, Ansys, позволяющие производить детальное изучение даже в самых мелких элементах и труднодоступных местах расчётной схемы. [3–13]

Основным технико-экономическим показателем бурения является механическая скорость бурения, которая во многом зависит от механизма разрушения горной породы [14–16]. Моделирование движения породоразрушающего инструмента на забое должно включать исследование изменения значения толщины слоя породы, срезаемого различными его резцами; температуры нагрева плоскости контакта резцов с породой и влияния ее значения на работу инструмента в целом; линий тока промывочной жидкости; давления жидкости в различных точках скважины и т. д.

Выбор объекта моделирования

Механическая скорость бурения во многом зависит от качества разрушения горной породы породоразрушающим инструментом. Одним из наиболее эффективных в бурении является алмазный породоразрушающий инструмент. Компьютерное моделирование требует четкой постановки задач и правильной подачи информации для последующей обработки. Поэтому в качестве удобного объекта моделирования выбрана алмазная однослойная коронка. Армирована такая коронка крупными синтетическими монокристаллами с размером зерна около 1,5 мм в диаметре, что позволяет обеспечивать заданный выпуск алмазных резцов [17]. Располагаются монокристаллы на торце коронки по известной радиальной схеме раскладки [18, 19]. Такое расположение имеет определенный порядок, является закономерным, позволяет присваивать каждому алмазу фиксированные координаты и систематизировать работу линий резания. При выборе в качестве объекта моделирования алмазной однослойной коронки с заданным выпуском крупных синтетических монокристаллов, расположенных по радиальной схеме, важным фактором является симметричность получаемой в результате модели.

О применении компьютерного моделирования при исследовании процессов, протекающих при бурении скважин

Положение каждого алмазного монокристалла представленной коронки во время работы на забое определяется углом её поворота (φ) и углубкой коронки (z) (рис. 1). Каждая линия резания коронки дополнительно характеризуется координатами поверхности забоя ($y(\varphi)$) в каждой своей точке. Толщину слоя породы, срезаемую алмазом в конкретной точке забоя при определенном положении коронки, можно определить из выражения (1) [19]:

$$h_i = z - y_i, \tag{1}$$

где y_i – координата поверхности забоя перед конкретным алмазом.

При постоянной осевой нагрузке соблюдается условие неизменности площади внедрения всех алмазов в забой, таким образом имеем соотношение (2):

$$\sum_{i=1}^{n_a} h_i = n_{\kappa} h_a, \qquad (2)$$

где h_a – глубина внедрения монокристалла в породу при статическом вдавливании (рис. 1, *a*). Значение h_a может рассчитываться по уточненным формулам [20], при этом учитываются свойства разрушаемой горной породы (k_a) и форма алмаза (k_a) [20].

Как показывает аналитическое исследование процесса движения коронки по забою в процессе бурения скважины, при вращении, за счет осевого



Рис. 1. Схема взаимодействия алмазов коронки одной линии резания с забоем скважины. Углубка алмазов в породу: а) первоначальная; б) при прохождении меньшего расстояния, чем расстояние между алмазами на одной линии резания (l_a); в) после прохождения расстояния l_a

Fig. 1. Diagram of interaction of a single-line crow diamond with a well bottom. Depth of diamonds in the rock: a) initial; 6) with the passage of distance smaller than that between the diamonds on the same line of cutting; e) after passing the distance l_a

усилия, происходит периодическое углубление коронки на величину Δ . Т. е. при каждом акте разрушения породы будет выполняться соотношение:

$$\sum_{i=1}^{n_a} (z - y_i + \Delta) = n_{\kappa} h_a, \qquad (3)$$

где Δ – приращение углубления коронки на каждом акте внедрения в породу.

Из уравнения (3) имеем значение D?, соответствующее определенному положению коронки на забое [16, 18].

$$\Delta = \frac{n_{\kappa}h_a - \sum_{i=1}^{n_{\kappa}} (z - y_i)}{n_{\kappa}} = h_a - \frac{1}{n_{\kappa}} \sum_{i=1}^{n_{\kappa}} (z - y_i).$$
(4)

Используя полученную математическую модель (4), зная точное расположение синтетических монокристаллов на торце коронки, можно осуществить моделирование процесса бурения алмазной однослойной коронкой и получить значение её периодической углубки Δ , координату нижнего торца коронки *z* и координаты поверхности забоя $y(\varphi)$ в любой точке и в любой момент времени.

Для реализации такой модели сотрудниками Донецкого национального технического университета разработана программа «koronka2», написанная на языке программирования Delphi. «koronka2» позволяет моделировать процесс движения однослойной алмазной коронки по забою скважины. Программа рассчитывает величину толщины слоя породы, срезаемого каждым алмазом в конкретный момент времени, определяет координату нижнего торца коронки, а также выдает на экран траекторию движение алмазов в осевом направлении по мере движения нижнего торца коронки. Данная программа предоставляет возможность при моделировании учитывать характер раскладки алмазов по торцу и конструктивные параметры коронки, что позволяет проводить сравнительную оценку влияния раскладки алмазов как на процесс движения торца коронки, так и на величину нагрузки каждого из алмазов в процессе бурения.

Исходными данными для моделирования являются координаты расположения каждого алмаза в торце коронки, а также величина первоначального углубления алмазов коронки при приложении осевой нагрузки без вращения коронки. Дополнительным необходимым параметром является общее количество точек моделирования, на которое разбивается линия резания.

Однако данный программный продукт имеет ряд недостатков. Одним из которых является зависимость от количества точек, на которые разбивается линия резания коронки. Причем чем больше задано точек в линии резания, тем точнее результаты моделирования. «koronka2» не учитывает свойства породы, профиль резца, режимы бурения.

Один из основных продуктов компании National Instruments – среда графического программирования LabVIEW, за счет возможности выполнения элементов параллельного программирования позволяет устранить некоторые допущения, принятые при использовании программы «koronka2». LabVIEW давно зарекомендовала себя как качественный программный продукт, обеспечивающий полноценные исследования сложных систем. LabVIEW используется в системах сбора и обработ-



Рис. 2. Интерфейс программы моделирования движения алмазной коронки по забою (среда программирования LabVIEW)

Fig. 2. Diamond crown motion simulation program interface (LabVIEW programming environment)



Рис. 3. Моделирование прохода алмазных резцов по породе: а) статическое внедрение коронки в породу; b) поворот коронки на угол, равный расстоянию между двумя смежными в линии резания алмазами сектора

Fig. 3. Modeling the passage of diamond cutters for the rock: a) static introduction of the crown into the rock; b) rotation of the crown by an angle equal to the distance between two adjacent diamonds in the cutting line

ки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами [21]. Идеологически LabVIEW ориентирована на решение задач в области научных исследований [22].

Опираясь на результаты ранее проведенных исследований работы отдельного резца на забое скважины [3], при исследовании эффективности разрушения горной породы породоразрушающим инструментом необходимо учитывать не только толщину слоя породы, срезаемого алмазом, но и остальные элементы сложной системы механизма разрушения породы. За счет принципа параллельного программирования [23] в LabVIEW имеется возможность моделировать поведение всех резцов и влияние резцов друг на друга. Среда графического программирования LabVIEW позволяет создавать дружелюбный графический интерфейс пользователя (рис. 2), характеризующийся гибкой настройкой и удобством конфигурирования [24]. На рис. 1 представлен внешний вид программы, который включает:

- установку начальных значений программы количество линий, секторов и радиальных рядов резания;
- окно моделирования расположения резцов коронки;

- график результатов моделирования максимальной и минимальной толщины срезаемой породы;
- график результатов моделирования визуализации двух уровней срезанной породы двумя резцами.

Среда программирования LabVIEW имеет большой набор дополнений и библиотек. Одно из дополнений – работа с графикой, позволяет в режиме реального времени отображать изменение различных геометрических фигур в зависимости от программируемых математических формул [25]. Данное дополнение позволило показать работу коронки с резцами в движении, а также динамику снимаемой резцами породы. На рис. 3 показаны копии экранных снимков моделирования прохода алмазных резцов по породе в двух тактах работы программы.

Реализация на языке LabVIEW является более современной, поскольку опирается на современные средства поддержки научных исследований, что позволит в дальнейшем добавлять новые функции и способы анализа данной научной задачи.

Используя комплексный подход к исследованию буровых процессов (с учетом механических, температурных, гидравлических явлений), протекающих при бурении скважин, часто возникают сложности с построением геометрии имитационной модели. К примеру, при разработке конструкции инструмента, в процессе исследования, неоднократно приходится изменять форму отдельных элементов, их расположение, размеры и т. д. При помощи программного комплекса САПР КОМ-ПАС-3D разработана параметрическая модель, позволяющая осуществлять автоматизированное построение моделей алмазной коронки. При её использовании можно задавать конструктивные параметры коронки: наружный и внутренний диаметр, количество секторов, количество алмазов в секторе, высота сектора, параметры раскладки алмазов и др. Пример полученной геометрии модели приведен на рис. 4.

Для детального изучения распределения механических нагрузок в коронке методом конечных элементов проведено моделирование ее работы на забое скважины с учетом осевых и крутящих усилий. Помимо геометрических данных коронки в качестве исходных в такой системе, как Ansys, возможно использование физико-механических свойств и формы алмаза, способ их закрепления в матрице, состав материала матрицы и режимы бурения. Результаты моделирования хорошо визуализированы (рис. 5) и позволяют сделать вывод о возможности бурения коронками с укороченным до 4 радиальных рядов секторами.

При разработке, особенно алмазного, породоразрушающего инструмента, внимание уделяется температурным процессам, которые могут повлиять на ход проходки скважины. Для исследования температурных процессов на контакте алмазов с горной породой проводится одновременное исследование тепловых и гидравлических явлений, протекающих при бурении скважин. Экспериментальные исследования температурных процессов всячески затруднены и не позволяют осуществлять прямые измерения непосредственно в источнике образования тепла. Моделирование в системе Ansys позволяет производить замер температуры даже внутри тела алмазного резца. При этом система позволяет за основу имитационной модели принять такую часть коронки, которая достоверно учитывает симметрию происходящих процессов, что значительно сокращает ресурсы компьютерного исследования. В этом случае границы модели задаются плоскостями симметрии и находятся в пределах области сектора коронки, проходя через центр промывочного окна.

Составляемая модель (рис. 6) состоит из нескольких областей решения поставленной задачи – доменов. Для каждой конструкции коронки составляется своя объемная модель. В каждой модели выделены: домен очистного агента, породы, сектора, корпуса и алмазов.



Puc. 4. Пример моделирования конструкции алмазной однослойной коронки **Fig. 4.** Example of modeling the design of a diamond single-layered crown





- **Рис. 5.** Схема распределения механических напряжений: а) в одном максимально нагруженном алмазе при работе коронки; b) в коронке с учетом действующей осевой нагрузки и крутящего момента
- Fig. 5. Scheme of mechanical stresses distribution: a) in one maximally loaded diamond while at crown operation; b) in the crown, taking into account the effective axial load and torque



Рис. 6. Пример модели взаимодействия алмазной однослойной коронки с породой на забое скважины: а) модель в сборе; b) домен корпуса, сектора и алмазов; с) домен воды. 1 – корпус; 2 – сектор; 3 – алмаз; 4 – очистной агент; 5 – порода

Fig. 6. Example of a model of a diamond single-layer crown interaction with a rock at well bottom: a) assembly model; b) domain of corps, sector and diamonds; c) domain water. 1 is the body; 2 is the sector; 3 is the diamond; 4 is the cleaning agent; 5 is the rock

Для каждого домена задаются начальные граничные условия теплообмена. Сопряжение между доменами описывается законами сохранения энергии, заложенными в системе моделирования. Передача тепла от домена к домену происходит без потерь и сопротивлений. При этом учитывается относительное вращение доменов. Для вращающихся доменов и на контакте с ними задается граничное условие вращающейся поверхности с заданной постоянной частотой вращения. С целью прибли-



Рис. 7. Пример результатов моделирования: а) температура нагрева и скорость течения жидкости; b) распределение давления жидкости при бурении скважины коронкой

Fig. 7. Example of simulation results: a) heating temperature and fluid flow rate; b) fluid presser distribution during crown drilling

жения модели к реальным условиям на границах модели задается коэффициент теплопередачи соответствующей породы [26].

Составленная 3D модель позволяет определять температуру, скорость течения жидкости, давление в любой точке призабойной зоны. Примеры результатов моделирования приведены на рис. 7.

Заключение

Для разработки нового породоразрушающего инструмента, отвечающего современным требованиям, необходимо достоверное исследование его работы на забое и использование прогрессивных инновационных подходов [27]. Предложенный пример исследования работы алмазной коронки с целью проектирования оптимальной её конструкции показывает, что

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нескоромных В.В., Попова М.С. Основы системного подхода к проектированию бурового инструмента // Научно-технический журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – 2018. – № 8. – С. 26–31.
- Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований // Научно-технический журнал «Инженер-нефтянник». – 2018. – № 3. – С. 18–26.
- Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.
- Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. All rights reserved. URL: https://www.slb.com/-/media/files/smith/catalogs/bits-catalog (дата обращения: 05.11.2018).
- Интегрированные системы и технологии. Каталог компании Schlumberger. URL: https://sis.slb.ru/ (дата обращения: 05.11.2018).
- Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2011. - № 48 (3). - P. 434-442.
- Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. - 2013. - № 37 (13). - P. 1913-1929.

- бурение скважин как модель является сложной системой моделирования, поэтому научные исследования процессов бурения должны основываться на комплексном подходе [1];
- решение задач моделирования бурения возможно с применением современных средств программирования;
- компьютерное моделирование дает возможность учитывать все факторы, влияющие на результат бурения;
- компьютерное моделирование позволяет проводить исследования даже в мелких элементах и труднодоступных местах расчётной схемы;
- метод компьютерного моделирования облегчает процесс анализа и визуализации результатов исследования.
- Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, L. Paez, U. Tran et al. // SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings. – USA, Miami, 2006. – P. 669–684.
- 9. Александров А.Н., Кищенко М.А., Рогачев М.К. Моделирование образования твердых органических частиц в высокопарафинистой пластовой нефти // Научно-технический журнал «Инженер-нефтянник». 2018. № 2. С. 42–49.
- Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. – № 96-97. – P. 109-119.
- Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit // Energies. 2018. № 11 (6). P. 1285–1287.
- Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. 2018. № 10 (6). P. 1-12.
- 13. Сериков Д.Ю., Гаффанов Р.Ф. Исследование напряженно-деформируемого состояния двух смежных центробежно-объемного-армированных зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – № 9. – С. 42–47.
- Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 191–195.

- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – № 39 (1). – P. 41–58.
- Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1965. № 2 (1). P. 57-73.
- Production of coarse-grained high-strength microgrits to be used in drilling tools / O.A. Zanevskii, S.A. Ivakhnenko, G.D. Il'nitskaya, A.P. Zakora, R.K. Bogdanov, A.A. Karakozov, M.C. Popova // Journal of Superhard Materials. – 2015. – V. 37. – № 2. – P. 85–96.
- 18. Определение максимальной углубки алмазных резцов однослойных коронок с радиальной раскладкой / А.А. Каракозов, М.С. Попова, С.Н. Парфенюк, Р.К. Богданов, А.П. Закора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины, 2012. – Вып. 15. – С. 203–206.
- 19. Исследование и разработка конструкции однослойной буровой коронки с синтетическими монокристаллами алмаза / А.А. Каракозов, М.С. Попова, С.Н. Парфенюк, Р.К. Богданов, А.П. Закора // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля национальной академии наук Украины, 2014. – Вып. 17. – С. 73–79.

- Буровой инструмент для геологоразведочных скважин: справочник / Н.И. Корнилов, Н.Н. Бухарев, А.Т. Киселев и др. / под ред. Н.И. Корнилова. М.: Недра, 1990. 395 с.
- Королев А.Л. Компьютерное моделирование. М.: БИНОМ. ЛЗ, 2013. – 230 с.
- Кринг Т.Дж. LabVIEW для всех. 4-е изд., переработанное и дополненное. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
- Тупицына А.И. Методы компьютерного моделирования физических процессов и сложных систем. – СПб.: Университет информационных технологий, механики и оптики, 2014. – 48 с.
- Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012, 208 с.
- Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде LabVIEW. – СПб.: Университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. – 82 с.
- 26. Исследование теплового режима однослойной алмазной коронкой с синтетическими монокристаллами / А.А. Каракозов, М.С. Попова, С.Н. Парфенюк, Р.К. Богданов, А.П. Закора // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. – 2015. – № 1 (22). – С. 39–44.
- Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225–230.

Поступила: 12.11.2018 г.

Информация об авторах

Попова М.С., старший преподаватель кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Харитонов А.Ю., кандидат технических наук, сертифицированный LabVIEW-разработчик.

UDC 622.24.051.64

COMPUTER SIMULATION OF PROCESSES AT WELL DRILLING

Marina S. Popova¹,

alleniram83@mail.ru

Anton Yu. Kharitonov²,

ant.kharitonov@gmail.com

- Siberian Federal University,
 95, «Krasnoyarskiy rabochy» newspaper avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.
- ² LabVIEW freelancer, Moiveien 2, 4460, Moi, Norway.

Relevance. The main drilling development direction is improving technical and economic indicators. The main direction is the new rockcutting tools generation, which ensures the effective rock destruction. To improve the technical and economic drilling indicators it is necessary to study the processes occurring during well drilling. Often the processes are complex and need to be detailed. This applies to narrow, hard-to-reach places in the bottomhole zone. In some cases, experimental research methods are difficult, expensive, or completely unavailable. In addition, the main modern requirement for scientific research is an integrated approach. It consists in a comprehensive and simultaneous consideration of all processes occurring during well drilling. In this regard, a relevant method is the computer simulation. This method studying drilling accurately, visually and reliably.

The aim of the research is the computer simulation of the processes occurring during drilling.

Objects: processes occurring during well drilling.

Methods: simulation modeling, analytical studies, analysis.

Results. The authors have identified the main drilling processes that need to be explored in the design and development of a new generation rock cutting tools. The paper considers the possibilities of computer modeling in study of drilling with diamond crowns. On the simplified model example for the interaction of rock cutting tools with rocks, software products are given. The results of their use are shown: the thickness of a rock layer removed by any diamond crowns, the tool location coordinates at any time, the heating temperature of the diamond single-layer crown, the distribution of mechanical stresses. The authors compared the modeling of the same drilling processes using different software products. The features, modeling accuracy of drilling processes are revealed. The computer simulation of drilling processes is grounded. The paper demonstrates the advantages of computer simulation over the experiment.

Key words:

Computer modelling, drilling, rock cutting tool, programming, parametric model, diamond layout, drill bit.

REFERENCES

- Neskoromnykh V.V., Popova M.S. Basis of the system approach to drilling tool design. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2018, no. 8, pp. 26–31. In Rus.
- Neskoromnykh V.V., Popova M.S. Diamond tool development using computer modelling data and system reserve results. *Petroleum Engineer*, 2018, no. 3, pp. 18–26. In Rus.
- Neskoromnykh V.V. Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin [Destruction of rocks during drilling]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2015. 336 p.
- Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. All rights reserved. Available at: https://www.slb.com/-/media/files/smith/catalogs/bits-catalog (accessed 5 November 2018).
- Integrated systems and technologies. Catalog of the Company Schlumberger. Available at: https://sis.slb.ru/ (accessed 5 November 2018).
- Su O., Ali Akcin. Numerucal simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mecha*nics and Mining Sciences, 2011, no. 48 (3), pp. 434–442.
- Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.
- Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *SPE/IADC Drilling Conference*. Proceedings. USA, Miami, 2006, 2006. pp. 669–684.

- 9. Aleksandrov A.N., Kishchenko M.A., Rogachev M.K. Modeling the formation of solid organic particles in highly paraffin reservoir oil. *Petroleum Engineer*, 2018, no. 2, pp. 42–49. In Rus.
- Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, no. 96-97, pp. 109-119.
- Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit. *Energies*, 2018, no. 11 (6), pp. 1285–1287.
- Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, no. 10 (6), pp. 1–12.
- 13. Serikov D.Yu., Gaffanov R.F. Investigation of the stress-strain state of two adjacent centrifugal-volume-reinforced teeth of the armament of a bit drilling tool. Construction of oil and gas wells on land and sea, 2018, no. 9, pp. 42–47. In Rus.
- Neskoromnykh V.V., Borisov K.I. Analytical study of rock cutting-spallation with PDC cutters chisels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 191–195.
- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, no. 39 (1), pp. 41–58.
- Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1965, no. 2 (1), pp. 57–73.
- Zanevskii O.A., Ivakhnenko S.A., Il'nitskaya G.D., Zakora A.P., Bogdanov R.K., Karakozov A.A., Popova M.C. Production of co-

arse-grained high-strength microgrits to be used in drilling tools. *Journal of Superhard Materials*, 2015, vol. 37, no. 2, pp. 85–96.

- Karakozov A.A., Popova M.S., Parfenuk S.N., Bogdanov R.K., Zakora A.P. Opredelenie maksimalnoy uglubki almaznykh reztsov odnosloynykh koronok s radialnoy raskladkoy [Determination of the maximum deepening of diamond incisors of single-layered crowns with a radial layout]. Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya. Sbornik nauchnykh trudov [Rock cutting and metalworking tools – machinery and technology of its production and application. Collection of scientific papers]. Kiev, Institute of Superhard Materials Publ., 2012. Iss.15, pp. 203–206.
- 19. Karakozov A.A., Popova M.S., Parfenuk S.N., Bogdanov R.K., Zakora A.P. Issledovanie i razrabotka konstruktsii odnosloynoy burovoy koronki s sinteticheskimi monokristallami almaza [Research and development of the contraction of a single-layer drill bit with synthetic diamond single crystals]. Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya. Sbornik nauchnykh trudov [Rock cutting and metalworking tools – machinery and technology of its production and application. Collection of scientific papers]. Kiev, ISM Publ., 2014. Iss.17, pp. 73–79.
- Kornilov N.I., Bukharev N., Kiselev A.T. Burovoy instrument dlya geologorazvedochnykh skvazhin: spravochnik [Drilling tools for exploration wells: reference]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 395 p.

- Korolev A.L. Kompyuternoe modelirovanie [Computer modelling]. Moscow, BINOM Publ, 2013. 230 p.
- Kring T.J. LabVIEW dlya vsekh [LabVIEW for everyone]. 4th ed. Moscow, DMK Press, 2011. 904 p.
- Tupitsyna A.I. Metody kompyuternogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov i slozhnykh sistem [Methods of computer modeling of physical processes and complex systems]. St. Petersburg, University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2014. 48 p.
- Magda Yu.S. LabVIEW: prakticheskiy kurs dlya inzhenerov i razrabotchikov [LabVIEW: a practical course for engineers and developers]. Moscow, DMK Press, 2012. 208 p.
- Vasiliev A.S., Lashmanov O.Yu. Osnovy programmirovaniya v srede LabVIEW [Basics of programming in the LabVIEW]. St-Petersburg, University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2015. 82 p.
- 26. Karakozov A.A., Popova M.S., Parfenuk S.N., Bogdanov R.K., Zakora A.P. Study of the thermal regime of a single-layer diamond crown with synthetic single crystals. *Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Mining and geolo*gical, 2015, no. 1 (22), pp. 39–44. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.

Received: 12 November 2018.

Information about the authors

Marina S. Popova, senior teacher, Siberian Federal University.

Anton Yu. Kharitonov, Cand. Sc., certified LabVIEW developer.

УДК 621.314.2-729.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Нос Олег Викторович¹,

nos@corp.nstu.ru

Востриков Анатолий Сергеевич¹,

vostrikov@sintez.nstu.ru

Штанг Александр Александрович¹,

shtang@corp.nstu.ru

Малявко Екатерина Юрьевна¹,

arteb@smc.nstu.ru

1 Новосибирский государственный технический университет,

Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Актуальность. В настоящее время все большее количество технологических процессов и производств в нефтегазовой отрасли реализуется на базе высокопроизводительного оборудования с полупроводниковыми преобразователями электрической энергии, в число которых, например, входят частотно-регулируемые электроприводы переменного тока или бесперебойные источники питания, которые относятся к классу нелинейных нагрузок и могут вызывать большое количество негативных явлений в работе распределительных сетей, включающих в себя несимметрию фазных напряжений и токов, резонансные процессы, тепловые потери в нейтральном проводе, перегрев двигателей и трансформаторов и т. д. Для улучшения электромагнитной совместимости различного рода электроприемников в составе промышленных систем электроснабжения довольно часто используют пассивные конденсаторные батареи для коррекции коэффициента мощности, которые малоэффективны в случае нелинейных процессов. Кроме этого, данный тип компенсационных устройств продолжает потреблять реактивную энергию при отсутствии каких-либо нагрузок и не удовлетворите современным требованиям в области энергосбережения. Описанные выше недостатки в работе трехфазных систем переменного тока требуют разработки новых схемотехнических решений, методов анализа энергетических процессов и синтеза алгоритмов силовой фильтрации, позволяющих обеспечить нормированные показатели качества электрической энергии в распределительных сетях низкого и среднего классов напряжения вне зависимости от конкретного вида электрических цепей нагрузки.

Цель исследования заключается в комплексном анализе существующих технических решений, направленных на повышение электромагнитной совместимости распределительных сетей, а также в описании основных ограничений в работе силовых фильтрокомпенсирующих устройств применительно к промышленным объектам минерально-сырьевого комплекса; в разработке базовых структур активных силовых фильтров с пониженными требованиями по производительности, объему памяти и быстродействию программно-аппаратной части системы управления, практическое применение которых обеспечивает нормированное качество электрической энергии при изменении режимов работы технологического оборудования или конфигурации питающей линии.

Объекты: автономные или децентрализованные электроэнергетические системы переменного тока с преобразовательными устройствами силовой электроники и частотно-регулируемыми электроприводами, а также элементами силовой цепи с нелинейными характеристиками, например, реакторами или трансформаторами с насыщенными сердечниками, в которых присутствуют значительные искажения в мгновенной форме трехфазных сигналов; пассивные и активные силовые фильтры высших гармоник.

Методы: некоммутативная алгебра кватернионов; четырехмерное гиперкомплексное пространство; методы спектрального анализа и разложения в ряд Фурье.

Результат: краткий обзор различных подходов и технических средств к повышению качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных объектов минерально-сырьевого сектора, а также системы управления, в рамках которых достигается синусоидальный закон изменения во времени сетевых токов с нулевым или опережающим/отстающим угловым сдвигом при одновременном соблюдении условия симметрии по мгновенным значениям.

Ключевые слова:

Нелинейные электромагнитные процессы, энергоэффективность, силовые фильтрокомпенсирующие устройства, последовательно-параллельные активные силовые фильтры, гиперкомплексные числа.

Введение

В настоящее время одним из наиболее эффективных путей существенного увеличения текущих объемов добычи и переработки полезных ископаемых является глубокая модернизация существующего электрооборудования технологических машин на базе современных полупроводниковых преобразователей электрической энергии с микропроцессорным управлением, установленная мощность которых может достигать десятков MBA [1]. Данный класс устройств силовой электроники, в силу протекающих в них существенно нелинейных электромагнитных процессов, вызывает амплитудно-фазовую асимметрию и искажения в мгновенной форме электрических сигналов распределительной сети [2], которые сопровождаются дополнительными потерями в трансформаторах и коммутационной аппаратуре, неравномерной загрузкой фаз линий электропередачи, интенсивным старением изоляции электрических машин и т. д.

Для исключения влияния указанных выше негативных факторов на энергоэффективность систем электроснабжения объектов горнодобывающей или нефтегазовой инфраструктуры, что особенно актуально в случае их ограниченной пропускной способности или большой протяженности, применяются специальные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) пассивного или активного принципа действия [3]. Данная статья посвящена анализу современных технических средств силовой фильтрации высших гармоник для диапазона низкого и среднего класса напряжений, позволяющих значительно снизить величину среднеквадратических потерь в общем составе активной мощности, затрачиваемой на реализацию производственного процесса.

Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства

Пассивные ФКУ, которые в зависимости от конкретного вида частотных характеристик подразделяются на резонансные RLC-контуры, фильтры верхних частот или их различные совместные комбинации, осуществляют шунтирование источника с суммарным операторным сопротивлением $Z_s(p)$ по цепи прохождения пульсационных составляющих тока нагрузки i_h в соответствии со следующим соотношением [4]:

$$i_f = \frac{Z_s(p)}{Z_s(p) + Z_f(p)} i_h,$$

f – нижний индекс, показывающий на принадлежность параметра или переменной к ФКУ.

Как видно из последней формулы, в идеализированном случае должно выполняться предельное требование

$$\frac{Z_s(p)}{Z_s(p) + Z_f(p)} \to 1,$$

которое на практике принимается равным 0,995 [5] и имеет место при $Z_s(p) >> Z_t(p)$.

На рис. 1 изображены упрощенные принципиальные схемы наиболее распространенных в энергетическом комплексе топологий пассивных ФКУ второго порядка, которые настраиваются на частоту фильтрации

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}},\tag{1}$$

а их динамические свойства описываются следующими соотношениями [6]:

• пассивный резонансный контур (рис. 1, *a*)

$$Z_{f}(p) = \frac{C_{f}L_{f}p^{2} + C_{f}R_{f}p + 1}{C_{f}p},$$
 (2)

 силовой фильтр высокочастотных гармоник (рис. 1, б)

$$Z_{f}(p) = \frac{C_{f}L_{f}p^{2} + T_{f}p + 1}{C_{f}p(T_{f}p + 1)},$$
(3)

где $T_{f} = L_{f}R_{f}^{-1}$ – постоянная времени.



Рис. 1. Пассивные ФКУ второго порядка

Fig. 1. Passive second-order filters

Качественные показатели работоспособности данного типа Φ КУ в частотной области однозначно определяются добротностью, которая зависит от выбора R_i и для RLC-цепи с (2) вычисляется по формуле [7]:

$$Q = \omega_0 \frac{L_f}{R_f} = \frac{1}{R_f} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}}$$

располагаясь внутри диапазона от 20 до 100 [3], а в случае $Z_{f}(p)$ вида (3) величина данного параметра ограничена интервалом 0,5...2 и находится как

$$Q = \frac{1}{\omega_0 T_f} = R_f \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}.$$

На рис. 2 изображены графические зависимости $|Z_{f}(j\omega)|$ рассмотренных выше пассивных фильтров высших гармоник, иллюстрирующих влияние Q на участок АЧХ вблизи желаемой частоты ω_{0} .

В качестве графической иллюстрации принципа действия пассивных ФКУ на рис. 3, 4 изображены полученные в программном приложении «MATLAB-Simulink2 трехфазные токи и гистограмма частотного спектра питающей неуправляемый мостовой выпрямитель распределительной линии с параметрами

до и после включения двух резонансных контуров с $Z_{f}(p)$ вида (2), настроенных в соответствии с формулой (1) на 5-ю и 7-ю гармоники.

Как видно из результатов цифрового моделирования, пассивная фильтрация позволяет обеспечить приемлемый уровень высших гармоник в $i_s(t)$, амплитудные значения которых непосредственно зависят от температурного дрейфа параметров ФКУ, а также текущих вариаций частоты и конфигурации распределительной сети [2, 5].



Рис. 2. ЛАЧХ полосового (а) и высокочастотного (б) фильтров второго порядка

Fig. 2. Asymptotic Bode magnitude plots of tuned (a) and high-pass (b) second-order filters



Рис. 3. Трехфазные сетевые токи до (а) и после (б) пассивной фильтрации 5-й и 7-й гармоник

Fig. 3. Three-phase grid current waveforms before (a) and after (b) passive mitigation of 5th and 7th harmonics



Рис. 4. Спектральный состав сетевого тока в трехфазной системе с мостовым выпрямителем до (а) и после (б) пассивной фильтрации 5-й и 7-й гармоник

Fig. 4. Harmonic content of three-phase grid currents for the bridge rectifier before (a) and after (b) passive mitigation of 5th and 7th harmonics

Активные фильтрокомпенсирующие устройства

Активные силовые фильтры (АСФ), являющиеся в настоящее время наиболее эффективным техническим средством приведения реальных показателей качества электропитания к нормированным величинам, осуществляют непрерывную генерацию в систему электроснабжения сигналов компенсации сложной периодической формы, обратных по мгновенным значениям, как амплитудно-фазовым отклонениям, так и имеющим место искажениям.

В зависимости от способа подключения данного типа ФКУ относительно трехфазной сети TG и эксплуатируемого электрооборудования TL, силовые преобразовательные устройства активной фильтрации подразделяются [2, 3, 8, 9] на параллельные (shunt active power filter) и последовательные (series active power filter) AC Φ , которые корректируют мгновенную форму сетевых токов и напряжений соответственно, а также их последовательнопараллельная комбинацию (unified power quality conditioner), что иллюстрирует рис. 5, на котором используются следующие обозначения: СВ - система управления, осуществляющая на основании текущей информации с датчиков токов CS и напряжений VS формирование уставок i_t^* и u_t^* на компенсационные воздействия i_i или u_i ; VSI1, VSI2 – автономные инверторы с ШИМ-законом коммутации полупроводниковых ключей, первый из которых входит в состав последовательного АСФ, а второй параллельного ФКУ; С - емкостной накопитель электрической энергии; L - индуктивный дроссель, ограничивающий пульсации выходных токов *i_i*; Т – согласующий трансформатор однофазного или трехфазного исполнений.



Рис. 5. Упрощенная функциональная схема последовательно-параллельного АСФ

Fig. 5. Simplified bloc diagram of the series-shunt active power filters (APF)

В отличие от рассмотренных выше пассивных RLC-цепей, исключающих из частотного спектра трехфазных токов только высшие гармоники, ACФ обладает более широким набором функциональных возможностей [2, 3, 9], включающих в себя коррекцию углового сдвига, исключение активных потерь в нулевом проводе, демпфирование резонансных явлений и т. д.

Аналитическая процедура синтеза алгоритмов активной фильтрации основывается на предварительном выделении из общего потока электрической энергии в единицу времени неактивных составляющих мгновенной мощности в рамках векторного [10, 11] или алгебраического [12, 13] подходов к анализу энергетических характеристик трехфазных систем. Как отмечено в [14], в последнем случае удается значительно повысить быстродействие численного расчета i_t^* или u_t^* по отношению к структурам первого типа за счет сокращения общего количества выполняемых математических операций и отказа от линейных преобразований исходного базиса, что в конечном итоге позволяет при прочих равных условиях снизить итоговые требования по производительности и объему памяти, которые предъявляются к программноаппаратной части системы управления.

В связи с тем, что параллельные АСФ обладают рядом преимуществ по отношению к последовательному типу активного ФКУ [3, 9], далее остановимся более подробно на законе компенсации в форме токов *i_i* с использованием четырехмерного гиперкомплексного пространства, представив трехфазные переменные в следующем виде [15]

$$\mathbf{X}_{ABC} = x_A \circ \mathbf{q}_1 + x_B \circ \mathbf{q}_2 + x_C \circ \mathbf{q}_3, \qquad (4)$$

здесь x_A , x_B , x_C — мгновенные значения электрических величин; \mathbf{q}_1 , \mathbf{q}_2 , \mathbf{q}_3 — мнимые единицы, подчиняющиеся некоммутативным правилам произведения, в результате чего кватернион мгновенной мощности находится как [16]

$$\mathbf{P}_{ABC} = \mathbf{U}_{ABC} \circ \mathbf{I}_{ABC} = \operatorname{Re} \mathbf{P}_{ABC} + \operatorname{Im} \mathbf{P}_{ABC} , \qquad (5)$$

где $\operatorname{Re} \mathbf{P}_{ABC}$, $\operatorname{Im} \mathbf{P}_{ABC}$ – вещественная и мнимая части $\operatorname{Re} \mathbf{P}_{ABC} = p_{ABC} \circ \mathbf{1}$; $\operatorname{Im} \mathbf{P}_{ABC} = q_A \circ \mathbf{q}_1 + q_B \circ \mathbf{q}_2 + q_C \circ \mathbf{q}_3$, вещественные коэффициенты которых вычисляются в соответствии со следующими формулами

$$p_{ABC} = -u_A i_A - u_B i_B - u_C i_C ,$$

 $q_A = u_B i_C - u_C i_B$, $q_B = u_C i_A - u_A i_C$, $q_C = u_A i_B - u_B i_A$.

Для математического описания трехфазных токов нагрузки $I_{_{ABC}}$ в функции $P_{_{ABC}}$ применяется обратный кватернион напряжений [14]

$$\mathbf{U}_{ABC}^{-1} = -\left\|\mathbf{U}_{ABC}\right\|^{-1} \circ \mathbf{U}_{ABC},$$

здесь $\|\mathbf{U}_{ABC}\| = \sum_{j=A,B,C} u_j^2$ – норма гиперкомплексно-

го числа вида (4), с учетом которого становится справедливым [2]

$$\mathbf{I}_{ABC} = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ (\operatorname{Re}\mathbf{P}_{ABC} + \operatorname{Im}\mathbf{P}_{ABC}) = \mathbf{I}_{ABC}^{p} + \mathbf{I}_{ABC}^{q}$$

т. е. по аналогии с (5) I_{ABC} также раскладывается на активную (вещественную) I^{p}_{ABC} и реактивную (мнимую) I^{q}_{ABC} компоненты [15]

$$\mathbf{I}_{ABC}^{p} = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \operatorname{Re} \mathbf{P}_{ABC} = i_{A}^{p} \circ \mathbf{q}_{1} + i_{B}^{p} \circ \mathbf{q}_{2} + i_{C}^{p} \circ \mathbf{q}_{3},$$
$$\mathbf{I}_{ABC}^{q} = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \operatorname{Im} \mathbf{P}_{ABC} =$$
$$= (i_{A} - i_{A}^{p}) \circ \mathbf{q}_{1} + (i_{B} - i_{B}^{p}) \circ \mathbf{q}_{2} + (i_{C} - i_{C}^{p}) \circ \mathbf{q}_{3},$$

где i_{A}^{p} , i_{B}^{p} , i_{C}^{p} – вещественные коэффициенты при мнимых единицах [13]

$$i_j^p = -\left\|\mathbf{U}_{ABC}\right\|^{-1} \circ u_j \circ \operatorname{Re}\mathbf{P}_{ABC}.$$

Как показывают представленные в [16] результаты аналитического исследования \mathbf{P}_{ABC} в случае различного рода потребителей электрической энергии, параметрическая асимметрия, насыщение, нелинейные вольт-амперные характеристики элементов электрооборудования и т. д. приводят к образованию \mathbf{I}_{ABC}^{r} и мультигармонических пульсаций в составе \mathbf{I}_{ABC}^{p} , вычисляемых как

$$\tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^{p} = \mathbf{I}_{ABC}^{p} - \overline{\mathbf{I}}_{ABC}^{p},$$

здесь $\overline{\mathbf{I}}_{ABC}^{p} = \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \overline{p}_{ABC}$ – переменная составляющая \mathbf{I}_{ABC}^{p} , изменяющаяся во времени с частотой сети $\omega_{s} = 2\pi \cdot 50 \, \mathrm{c}^{-1}$, которая зависит от среднего значения $\operatorname{Re} \mathbf{P}_{ABC}$ и выступает в качестве эталона энергопотребления, в результате чего окончательно получаем следующий закон активной фильтрации [2]

$$\mathbf{I}_{f} = \tilde{\mathbf{I}}_{ABC}^{p} + \mathbf{I}_{ABC}^{q} - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \Delta \overline{p} = = \mathbf{I}_{ABC} - \overline{\mathbf{I}}_{ABC}^{p} - \mathbf{U}_{ABC}^{-1} \circ \Delta \overline{p},$$
(6)

где $\Delta \bar{p}$ – стабилизирующая добавка, обеспечивающая поддержание на заданном уровне напряжения емкостного накопителя энергии u_{dc} , который, как отмечено в [2], при прочих равных условиях реализуется на практике с меньшим количеством выполняемых математических операций по отношению к традиционным структурам.

Для получения текущей информации о мгновенных значениях I_{ABC}^{p} в (6) можно воспользоваться специальными динамическими подсистемами оценивания [17, 18] или определить данную гиперкомплексную переменную при помощи разложения трехфазных токов нагрузки в ряд Фурье [11]:

$$i_j = \frac{B_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin(k\omega_s t) + B_k \cos(k\omega_s t)),$$

где B_0, A_k, B_k – коэффициенты, определяемые как

$$A_{k} = \frac{\omega_{s}}{\pi} \int_{0}^{2\pi\omega_{s}^{-1}} i_{j} \sin(k\omega_{s}t) dt \text{ при } k = 1, 2, 3...,$$
$$B_{k} = \frac{\omega_{s}}{\pi} \int_{0}^{2\pi\omega_{s}^{-1}} i_{j} \cos(k\omega_{s}t) dt \text{ при } k = 0, 1, 2, 3...,$$

и использования формул синуса и косинуса двойного угла, в соответствии с которыми становятся справедливы следующие соотношения

$$i_{j}\cos\omega_{s}t =$$

$$= \frac{B_{1}}{2} + \frac{B_{0}}{2}\cos\omega_{s}t + \frac{B_{1}}{2}\cos 2\omega_{s}t + \frac{A_{1}}{2}\sin 2\omega_{s}t + \dots,$$

$$i_{j}\sin\omega_{s}t =$$

$$= \frac{A_{1}}{2} + \frac{B_{0}}{2}\sin\omega_{s}t + \frac{B_{1}}{2}\sin 2\omega_{s}t - \frac{A_{1}}{2}\cos 2\omega_{s}t + \dots,$$

здесь $\cos \omega_s t$, $\sin \omega_s t$ – тригонометрические функции углового сдвига напряжений сети u_A , u_B , u_C частотой 50 Гц, получаемые на выходе специального контура фазовой автоподстройки в координатных осях α , β после преобразование Кларк (E. Clarke Transformation) [19].

Как видно из правой части последних равенств, амплитудные значения A_1 и B_1 основной гармоники в установившемся процессе представляют собой неизменные во времени величины, которые можно выделить из измеренного сигнала i_j с помощью специальной подсистемы с фильтром низких частот ФНЧ, показанной на рис. 6.

В качестве графической иллюстрации фильтрующих свойств АСФ с алгоритмом управления вида (6), параметры которого представлены в таблице, на рис. 7, 8, изображены экспериментальные зависимости сетевых токов i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} и кватерниона мгновенной мощности \mathbf{P}_{ABC} трехпроводной RL-нагрузки с отсекающим диодом в фазе *B*, вещественные коэффициенты мнимой части которого равны друг другу [13]

$$q_A = q_B = q_C.$$



Рис. 6. Функциональная схема получения основной гармоники фазного тока нагрузки *i*₁₁

Fig. 6. Block diagram for obtaining fundamental harmonic of load phase current i_{j1}

Габлица.	Параметры АС Φ
Table.	APF parameters

Параметр силовой части АСФ Power unit parameter	Значение Value
Емкость накопителя электрической энергии Electric energy storage capacity	1,65 мФ (mF)
Индуктивность выходных дросселей Inductance of the output inductors	9,4 мГн (mH)
Частота коммутации IGBT-модулей инвертора Switching frequency of IGBT modules of the inverter	2,7 кГц (kHz)
Коэффициент датчика напряжения Voltage sensor ratio	0,01 o.e. (p.u.)
Коэффициент датчика тока/Current sensor ratio	0,18 BA ⁻¹ (VA ⁻¹)



Рис. 7. Трехфазные токи сети при питании нелинейной RL-нагрузки

Fig. 7. Grid three-phase currents in case of the nonlinear RL-load

В свою очередь на рис. 9 приведены осциллограммы аналогичных переменных i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} до и после вступления в работу параллельного АСФ, сопровождаемого одновременным зарядом силовой емкости С от начального значения 340 В до величины 475 В, которые иллюстрируют динамиче-



Рис. 8. Вещественная (а) и мнимая (б) части кватерниона мгновенной мощности

Fig. 8. Real (a) and complex (b) components of the instantaneous power quaternion



Fig. 9. Grid currents i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} , DC link voltage u_{dc} and compensating current i_{tB} in the three-phase system with APF

ские характеристики AC Φ , а также соответствующее компенсационное воздействие фазы B.

При этом также необходимо отметить, что для снижения влияния высокочастотных пульсаций i_i на гармонический состав сигналов распределительной сети вследствие дискретного характера работы автономного инвертора АСФ, на его выходе дополнительно устанавливается пассивный фильтр LCL- или LLCL-топологий [20].

Заключение

На основании представленных в данной статье кратких сведений о силовых устройствах пассивной и активной фильтрации высших гармоник можно заключить, что практическое применение ФКУ позволяет увеличить пропускную способность линий электропередачи и до 30 % уменьшить среднеквадратичные потери при передаче, распределении и преобразовании электрической энергии переменного тока за счет частичной или полной компенсации неэффективных составляющих мгновенной мощности, вызванных асимметрией и нелинейностью процессов в электрооборудовании технологических машин [21]. При этом включение в систему электроснабжения АСФ является более предпочтительным по отношению к шунтирующим RLC-цепям соответствующего порядка, т. к. в этом случае достигается полная инвариантность к температурному дрейфу параметров, осуществляется автоматическая подстройка алгоритма управления при изменении режимов работы нагрузки или конфигурации распределительной сети, а также полностью отсутствуют какие-либо ограничения по качественному составу электрической энергии.

Исследование выполнено в рамках программы «Разработка эффективного устройства нового поколения для компенсации реактивной мощности и подавления гармонических составляющих токов высших порядков в электроэнергетике», гос. задание № 8.10997.2018/11.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Методика расчета электромагнитных процессов в многоуровневых полупроводниковых преобразователях для электротехнического оборудования горнодобывающей промышленности / Б.Ф. Симонов, М.А. Дыбко, С.В. Брованов, С.А. Харитонов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. СО РАН. – 2015. – № 2. – С. 97–110.
- Нос О.В. Методы анализа и синтеза трехфазных систем с активными силовыми фильтрами в гиперкомплексном пространстве: дис.... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 385 с.
- Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. 2005. – V. 93. – № 12. – P. 2128–2141.
- Phipps J.K. A transfer function approach to harmonic filter design // IEEE Industry Applications Magazine. - 1997. - V. 3. -P. 68-82.
- Das J.C. Passive filters potentialities and limitations // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2004. – V. 40. – № 1. – P. 232–241.
- Nassif A.B., Xu W. Passive harmonic filters for medium-voltage industrial systems: practical considerations and topology analysis // The 39th North American Power Symposium Proceedings. – Las Cruces, New Mexico, USA, September 30 – October 2, 2007. – P. 301–307.
- Gonzalez D.A., McCall J.C. Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1987. - V. IA-23. - № 3. - P. 504-512.
- Khadkikar V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview // IEEE Transactions on Power Electronics. - 2012. - V. 27. - № 5. - P. 2284-2297.
- Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. 2 ed. – Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017. – 450 p.
- Willems J.L. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: a geometrical approach // European Transactions on Electrical Power. - 1996. - V. 6. - № 5. - P. 299-304.
- Herrera R.S., Salmeron P., Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation different approaches, assessment, and experimental results // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2008. - V. 55. - № 1. -P. 184-196.
- Cristaldi L., Ferrero A. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach // European Transactions on Electrical Power. - 1996. - V. 6. - № 5. - P. 305–309.

- Nos O.V. Control strategy of shunt active power filter based on an algebraic approach // The 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2015: proc. – Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 459–463.
- Nos O.V., Brovanov S.V., Dybko M.A. Development of active filtering algorithms for higher harmonics in electrical power circuits // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52. № 6. P. 557–562.
- Brasil V.P., Filho A. de L.F., Ishihara J.Y., Electrical three phase circuit analysis using quaternions // The 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). – Ljubljana, Slovenia, 13–16 May, 2018. – P. 1–6.
- Nos O.V., Dudin A., Petzoldt J. The instantaneous power quaternion of the three-phase electric circuit with linear load // The 17 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016: proc. Altai, Erlagol, 30 June 4 July 2016. Novosibirsk: NSTU, 2016. P. 526–531.
- 17. A method to improve the dynamic performance of moving average filter based PLL / J. Wang, J. Liang, F. Gao, L. Zhang, Z. Wang // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. V. 30. № 10. P. 5978-5990.
- Fault-decoupled instantaneous frequency and phase angle estimation for three-phase grid-connected inverters / G. de Donato, G. Scelba, G. Borocci, F.G. Capponi, G. Scarcella // IEEE Transactions on Power Electronics. - 2016. - V. 31. - № 4. -P. 2880-2889.
- Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. - 1951. - V. 70. - № 2. - P. 1248-1255.
- LLCL-filtered grid converter with improved stability and robustness / M. Huang, X. Wang, P.C. Loh, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on Power Electronics. - 2016. - V. 31. - № 5. -P. 3958-3967.
- Паймухин Е.Т. Энергоэффективность применения динамического фильтро-компенсирующего устройства ДФКУ в ООО «РН-ПУРНЕФТЕГАЗ» // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 58–60.

Поступила 26.02.2019 г.

Информация об авторах

Hoc O.B., доктор технических наук, профессор кафедры проектирования технологических машин Новосибирского государственного технического университета.

Востриков А.С., доктор технических наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета.

Штанг А.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета,.

Малявко Е.Ю., аспирант Новосибирского государственного технического университета.

UDC 621.314.2-729.3

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PRODUCTION BY USING POWER HARMONIC FILTERS

Oleg V. Nos¹,

nos@corp.nstu.ru

Anatoliy S. Vostrikov¹, vostrikov@sintez.nstu.ru

.

Alexandr A. Shtang¹, shtang@corp.nstu.ru

Ekaterina Yu. Malyavko¹,

arteb@smc.nstu.ru

¹ Novosibirsk State Technical University,

20, Karl Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

Relevance. At present time many technological processes in oil and gas industry sector apply the high-performance three-phase equipments with power electronic converters such as variable-frequency AC drives or uninterruptible power supplies which are nonlinear loads and can cause various problems in distribution systems, including voltage and current unbalance, resonances phenomena, resistance current losses in the neutral wire, overheating of motors and transformers etc. In order to improve the electromagnetic compatibility of different power consumers in the industrial power supply systems the passive capacitor compensators for reactive power correction are usually used, that are ineffective in case of nonlinear loads. Furthermore this equipment generates the reactive power even if any loads are absent and do not meet modern requirements in area of power conditioning. To avoid the impact of the above-mentioned drawbacks on normal operation conditions of three-phase systems the development of novel technical approaches to power circuit design, methods for analyzing of electrical power processes and control strategies for power filtering are needed that provide the desired power quality in the low voltage and medium voltage distribution grids regardless of the load electrical circuits.

The aim of the research is a comprehensive analysis of existing approaches to electromagnetic compatibility improvement of the threephase loads in the distribution AC system and description of the main restrictions of power compensators under normal operation conditions for industrial applications in mineral resources sector; the control design for enhancing an operational stability of active power filters under time-varying parameter disturbances as well as variations of load behaviors or distribution system configuration.

Objects: AC electrical power supply systems with power electronics converters and load units in which there are distortions in the instantaneous sinusoidal waveforms of grid three-phase variables; passive and active power filters for high-frequency harmonic correction. **Methods:** non-commutative algebra of quaternion; four-dimensional hyper-complex space representation; methods of spectral analysis and Fourier series decomposition.

Results: the brief survey of different approaches and techniques to the power quality enhancing in the AC electrical power supply systems of mineral resources industrial sector and control strategy of active power filters that will provide balanced or/and sinusoidal grid currents in the three-phase systems with the zero or leading/lagging phase shift relative to the corresponding voltage.

Key words:

Nonlinear electromagnetic processes, energy efficiency, power compensators, series-shunt active power filters, hyper-complex numbers.

The research is performed within the program «Development of an energy effective device for compensation of reactive power and suppression of high-order harmonic components in the power systems», public research program of Russian Federation No. 8.10997.2018/11.12.

REFERENCES

- Simonov B.F., Dybko M.A., Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Calculation procedure for electromagnetic processes in multilevel semiconductor converters for electrical equipment in mining. *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 280–291.
- Nos O.V. Metody analiza i sinteza trekhfaznykh system s aktivnymi silovymi filtrami v giperkompleksnom prostranstve. Dis. Dokt. nauk [Analysis and design methods of three-phase systems with active power filters in the hyper-complex space. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2015. 385 p.
- 3. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141.
- Phipps J.K. A transfer function approach to harmonic filter design. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1997, vol. 3, pp. 68-82.

- Das J.C. Passive filters potentialities and limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 232–241.
- Nassif A.B., Xu W. Passive Harmonic filters for medium-voltage industrial systems: practical considerations and topology analysis. *The* 39th North American Power Symposium Proceedings. Las Cruces, New Mexico, USA, September 30 – October 2, 2007. pp. 301–307.
- Gonzalez D.A., McCall J.C. Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, vol. IA-23, no. 3, pp. 504-512.
- Khadkikar V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electro*nics, 2012, vol. 27, no. 5, pp. 2284–2297.
- Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2017. 450 p.

- Willems, J.L. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: a geometrical approach. *European Transactions* on *Electrical Power*, 1996, vol. 6, no. 5, pp. 299–304.
- Herrera R.S., Salmeron P., Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation different approaches, assessment, and experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 1, pp. 184–196.
- Cristaldi L., Ferrero A. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach. *European Tran*sactions on Electrical Power, 1996, vol. 6, no. 5, pp. 305–309.
- Nos O.V. Control strategy of shunt active power filter based on an algebraic approach. The 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2015: proc. Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. Novosibirsk, NSTU, 2015. pp. 459–463.
- Nos O.V., Brovanov S.V., Dybko M.A. Development of active filtering algorithms for higher harmonics in electrical power circuits. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 557–562.
- Brasil V.P., Filho A. de L.F., Ishihara J.Y., Electrical three phase circuit analysis using quaternions. The 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Ljubljana, Slovenia, 13-16 May, 2018. pp. 1-6.
- 16. Nos O.V., Dudin A., Petzoldt J. The instantaneous power quaternion of the three-phase electric circuit with linear load. *The 17 In*-

ternational conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016: proc. Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. Novosibirsk, NSTU, 2016. pp. 526–531.

- Wang J., Liang J., Gao F., Zhang L., Wang Z. A method to improve the dynamic performance of moving average filter based PLL. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, no. 10, pp. 5978–5990.
- Donato de G., Scelba G., Borocci G., Capponi F.G., Scarcella G. Fault-decoupled instantaneous frequency and phase angle estimation for three-phase grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 2880–2889.
- Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255.
- Huang M., Wang X., Loh P.C., Blaabjerg F. LLCL-filtered grid converter with improved stability and robustness. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 3958–3967.
- Paymukhin E.T. Energy efficiency of application of dynamic filtering and compensating device DFCD at RN-Purneftegaz. *Engineering practice*, 2011, no. 6, pp. 58–60. In Rus.

Received: 26 February 2019.

Information about the authors

Oleg V. Nos, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

Anatoliy S. Vostrikov, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

Alexandr A. Shtang, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

Ekaterina Yu. Malyavko, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University.
УДК 622.276

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСАДКОГЕЛЕОБРАЗУЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ СКВАЖИН НА НЕФТЯНОЙ ЗАЛЕЖИ С ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТЬЮ

Поплыгина Ирина Сергеевна¹,

davydova_irina@bk.ru

Мордвинов Виктор Антонович¹,

mva44@bk.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 616990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Актуальность. Обводнение добывающих скважин – естественный процесс при разработке нефтяных месторождений. На процесс обводнения скважин в первую очередь влияет неоднородность коллектора по фильтрационным свойствам – послойная (по разрезу) и зональная (по простиранию), наличие подошвенной воды, водонефтяных зон, повышенная вязкость пластовой нефти. Скорость перемещения фронта вытеснения увеличивается в высокопроницаемых слоях, что ускоряет процесс преждевременного обводнения скважин.

Цель: выделить наиболее эффективные технологии водоизоляции в Пермском крае и исследовать возможность их использования на конкретном месторождении.

Объект: карбонатные залежи с высоковязкой нефтью Ножовской группы месторождений в Пермском крае. Средняя вязкость пластовой нефти для 8 объектов разработки в отложениях турнейского яруса (T) составляет 72,1 мПа*с при высоком значении коэффициента расчлененности (6,23). Средние значения соотношения обводненности и выработки запасов нефти доходят до 1,8. В таких условиях необходимо проведение работ по ограничению притока воды в добывающие скважины.

Методы: анализ результатов выполненных работ по снижению обводненности скважин, гидродинамическое моделирование водоизоляционных и потоковыравнивающих работ в скважинах на нефтяном месторождении.

Результаты. В Пермском крае более высокая эффективность при ограничении притока воды в добывающие скважины по промытым слоям для пластов с карбонатным коллектором отмечена для геле- и осадкообразующих технологий. В нагнетательных скважинах работы по выравниванию профилей приемистости осуществлялись в основном с применением цементов, смол и полиакриламида. Высокую эффективность показала технология с использованием осадко- и гелеобразующих компонентов на основе лигносульфонатов. Выполнено моделирование работы элемента залежи с использованием осадко- и гелеобразующих веществ для участка Березовского нефтяного месторождения. Приемистость верхнего интервала снизится на 82 % при проведении водоизоляционных работ. По добывающим скважинам в течение года обводненность снижается на 3...15 %, а суммарный дебит по нефти увеличивается на 0,9 т/сут.

Ключевые слова:

Обводненность, водоизоляция, осадкогелеобразующие технологии, лигносульфонаты.

Введение

Обводнение добывающих скважин при разработке нефтяных месторождений - естественный процесс, связанный с заполнением водой освобождающегося от нефти порового пространства продуктивных пластов. При равномерном продвижении фронта вытеснения вода достигает интервала перфорации добывающей скважины по всей вскрытой (перфорированной) толще пласта и скважина практически полностью обводняется за короткий промежуток времени. В реальных условиях продолжительность безводного периода работы скважин может изменяться от нулевых значений до многих месяцев, что связано с влиянием на процесс обводнения геолого-физических особенностей нефтяной залежи, в первую очередь неоднородности коллектора по фильтрационным свойствам - послойной (по разрезу) и зональной (по простиранию), наличием подошвенной воды, водонефтяных зон, повышенной вязкости пластовой нефти [1-4]. Скорость перемещения фронта в таких слоях увеличивается, что ускоряет процесс преждевременного обводнения скважин [5, 6]. Влияние неоднородности коллектора усиливается при повышенной и высокой вязкости пластовой

нефти. По мере заполнения нефтенасыщенного пласта вытесняющей водой и перемещения фронта вытеснения в направлении добывающей скважины гидравлические сопротивления в высокопроницаемых слоях постоянно снижаются. Наличие слоев горных пород с системами раскрытых сообщающихся трещин, что особенно характерно для карбонатных коллекторов, ускоряет процесс обводнения добывающих скважин.

Промытые и изолированные перемычками от нефтенасыщенных пропластков водонасыщенные слои в интервалах между нагнетательными и добывающими скважинами характеризуются, как правило, повышенными давлениями, под действием которых при достаточно длительных остановках скважин вода оттесняет нефть от забоев добывающих скважин и снижает фазовую проницаемость горных пород для нефти в призабойных зонах.

Объект исследования

В Пермском крае один из блоков залежей с высоковязкой нефтью приурочен к Ножовской группе месторождений [7]. Средняя вязкость пластовой нефти для 8 объектов разработки в отложениях

турнейского яруса (T) составляет 72,1 мПа*с при высоком значении коэффициента расчлененности (6,23). Повышенной вязкостью нефти характеризуются объекты в тульских (Тл), тульско-бобриковских (Тл-Бб) и башкирских (Бш) отложениях. В табл. 1 приведены средние по объектам разработки данные о выработке запасов нефти и обводненности продукции скважин в условиях поддержания пластового давления путем закачки воды в пласт. При наиболее неблагоприятных в отношении обводненности добывающих скважин условиях отношение «обводненность -выработка запасов» по турнейским объектам в 1,4 раза выше, чем для других объектов. На рис. 1 в качестве примера приведена динамика соотношения «обводненность-отбор» для турнейских объектов Березовского (1) и Западного (2) месторождений. Отклонение от «нормального» тренда таково, что без проведения работ по ограничению обводненности скважин выработка извлекаемых запасов при граничных условиях (обводненность 98 % и выше) может быть не обеспечена.

Таблица 1. Выработка извлекаемых запасов и обводненность продукции скважин (осредненные данные)

 Table 1.
 Issued investments and water production of wells (averaged data)

Объекты разработки Layer	Orfop or HN3,% Oil reserves, %	Обводненность, % Water cut, %	Обводненность/ выработка Water cut/Oil reserves	Проницаемость по керну, мкм ² Permeability, µm ²	Коэффициент песчанистости, д. ед. Sandiness	Коэффициент расчлененности, д. ед. Dismemberment	Вязкость нефти в пла- croвых условиях, мПа*c Oil viscosity at reservoir conditions, mPa *s	
T T	39,79	56,46	1,42	0,17	0,42	6,23	72,1	
Тл, Бб Tl, Bb	65,81	66,89	1,02	0,71	0,57	2,50	23,5	
Бш Bhs	38,33	41,93	1,09	0,15	0,37	5,18	11,1	



Puc. 1. Обводненность и выработка запасов нефти **Fig. 1.** Watercut and development of oil reserves

Анализ технологической эффективности работ по ограничению водопритока в скважины

Известно, что для замедления процесса обводнения добывающих скважин целесообразно проведение работ в нагнетательных скважинах по выравниванию профилей приемистости [8–12], включая закачку растворов полимеров [13–16], использование других технологий [17]. При этом более эффективны мероприятия по так называемому системному воздействию, когда работы по выравниванию профилей приемистости в нагнетательной и водоизоляционные работы в добывающей скважинах скоординированы во времени.

На рис. 2 и в табл. 2 [18, 19] представлены результаты более 300 ВИР (водоизоляционных работ) на нефтяных месторождениях Пермского края за 15 лет (до 2015 г. включительно). Более высокая эффективность при ограничении притока воды по промытым слоям для пластов с карбонатным коллектором отмечена для геле- и осадкообразующих технологий.



uc.2. Распределение технологий водоизоляционных работ в скважинах

Fig. 2. Distribution of waterproofing technology works in wells

Таблица 2. Результаты водоизоляционных работ на добывающих скважинах

Table 2.
 Results of work to limit the water content of production wells

Вид состава Type of composition	Продолжительность эффекта (сиижение обводненности), сут Duration of effect (reduction of water- cut), days	Снижение обводнен- ности % Reduction of water- cut, %
Гелеобразующие Gel-forming compounds	971	16,6
Гидрофобные эммульсии Hydrophobic emulsion	667	16,6
Кремнийорганические соединения Organosilicon compounds	650	18,0
Суспензии Suspensions	591	3,3
Твердеющие составы Cements	514	31,5
Сшитые полимерные системы Crosslinked Polymer Systems	253	9,3
На основе силиката натрия Based on sodium silicate	163	38,0
Осадкообразующие технологии Sediment Formation Technologies	142	13,0
Средние значения Average values	494	18,3

В нагнетательных скважинах работы по выравниванию профилей приемистости (ВПП) осуществлялись в основном с применением цементов, смол и полиакриламида.

На месторождениях Ножовской группы за последние годы в добывающих скважинах турнейских объектов водоизоляционные работы проводились с применением водного раствора гидролизованного полиакриламида ОВП-2 (6 скважин) и кремнийорганического вещества (1 скважина). На башкирских объектах в 7 скважинах для ВИР использовали ОВП-2, на одной скважине – цементный раствор. Для скважин с ОВП-2 снижение обводненности составило, в среднем, 7 % при продолжительности эффекта около 3 месяцев. При обработке скважин АКОР-БН обводненность снизилась с 97,2 до 96 % при кратковременном эффекте.

На нагнетательном фонде работы по ВВП осуществлялись с применением составов на основе полиакриламида. По 10 скважинам средний прирост добычи нефти по реагирующим добывающим скважинам составил 1,2 т/сут, средняя дополнительная добыча в расчете на одно мероприятие – 160 т.

Регулирование профилей приемистости нагнетательных скважин за счет ограничения проницаемости продуктивных пород может быть достигнуто применением различных методов и способов, основанных на формировании в высокопроницаемых пластах зон с повышенными гидравлическими сопротивлениями за счет высокой вязкости закачиваемой жидкости или изменения структуры пустотного пространства в процессе пластового осадкообразования. Вязкостное ограничение приемистости высокопроницаемых интервалов недостаточно эффективно из-за непродолжительного времени действия эффекта. Известные технологии регулирования профилей приемистости, основанные на внутрипластовом осадко- и гелеобразовании, характеризуются различной степенью воздействия (селективности) по отношению к пластам, отличающимся проницаемостью, насыщающими флюидами и вещественным составом горных пород.

На одной нагнетательной скважине (№ 351) выравнивание профиля приемистости проведено с применением разработанного в ПНИПУ осадкогелеобразующего лигносульфонатно-нефтяного состава [20]. Средний дебит по нефти для реагирующих добывающих скважин увеличился на 1,9 т/сут, дополнительная добыча нефти составила около 980 т при продолжительности эффекта более полугода. Состав включал сернокислый алюминий, технический лигносульфонат марки А, безводную нефть и соляную кислоту (менее 1 %).

По данным термометрии до проведения мероприятия закачиваемая в скважину вода (приемистость 150 м³/сут) поступала в основном в промытую верхнюю часть интервала перфорации. Сразу после обработки приемистость верхних интервалов снизилась до 18 % от общей приемистости (рис. 3).

С данным составом выполнены опытно-промышленные работы на трех элементах пласта БС-10 Усть-Балыкского нефтяного месторождения [21]. Каждый элемент включал одну нагнетательную и реагирующие добывающие скважины. По элементу с нагнетательной скважиной № 1624 работа добывающих скважин с повышенным дебитом продолжалась в течение трех месяцев, по элементам с нагнетательными скважинами № 1627 и 1646 продолжительность эффекта (по дополнительной добыче нефти) составила более одного года. В целом дополнительная добыча нефти по трем элементам превысила 11,5 тыс. т при работе добывающих скважин с обводненностью, сниженной, в среднем, в 1,25 раза (до мероприятия 44,2 %, после ГТМ – 35,4 %). Исследования по определению профиля приемистости после ВПП проведены на скв. 1627. Коэффициент работающей толщины увеличился с 0,4 до 0,68. Приемистость верхних пропластков уменьшилась с 250 до 173 м³/сут, доля не принимавших воду до ГТМ нижних пропластков в общей приемистости составила 52 %.



Рис. 3. Профиль приемистости скважины до (a) и после (б) использования состава ОЛИНС **Fig. 3.** Profile injectivity of the well before (a) and after (b) use of the composition OLINS

Гидродинамическое моделирование водоизоляционных и потоковыравнивающих работ в скважинах на нефтяном месторождении

При анализе состояния разработки турнейских объектов Ножовской группы месторождений выделена залежь южного купола Березовского месторождения (рис. 4), включающая нагнетательную скв. 779 и действующие добывающие скважины № 727, 780 и 933.



Рис. 4. Участок турнейской залежи Березовского месторождения

Fig. 4. Plot of the Tournaisian reservoir of the Berezovsky field

Средний дебит по нефти скважин составляет 3,27 т/сут, средняя обводненность 67,4 %. Обводненность превышает выработку запасов в целом по турнейской залежи месторождения в 1,57 раза. В нагнетательной скв. 779 с приемистостью 30 м³/сут около 80 % закачиваемой воды уходит в верхний интервал перфорации. В программном

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Study on the influence of injection/production type and well pattern and spacing on producing degree of thin and poor layers / S. Liang, Y. Liu, N. Zhang, B. Zeng // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 1 September 2018. V. 8. Iss. 3. P. 861-870.
- Кудряшова Д.А Использование вероятностно-статистических методов для определения источников обводнения скважинкандидатов для водоизоляционных работ (на примере визейского объекта месторождения Пермского края) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 26–36.
- Кочнева О.Е., Лимонова К.Н. Оценка обводненности скважин и продукции яснополянской залежи Москудьинского месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13. – № 10. – С. 66–72.
- Experimental studies on production performance of oil reservoirs with bottom water / C. Liu, K. Li, X. Tian, G. Zhao, Y. Chen, B.M. Mahlalela // Journal of Petroleum Science and Engineering.- January 2019. - V. 172. - P. 527-537.
- Characteristics and mechanism of water production for fractured vuggy carbonate reservoirs, Halahatang Oilfield / H. Min, L. Chen, L. Wang, L. Zhang, J. Chen // Journal of Southwest Petroleum University. - 1 February 2017. - V. 39. - Iss. 1. -P. 114-123.

комплексе Tempest More выполнено моделирование работы элемента с этой скважиной при условии, что по аналогии со скв. 351 приемистость верхнего интервала снизится на 80 % при проведении ВПП с водоизоляционным составом. По добывающим скважинам в течение года обводненность снижается на 3...15 %, суммарный дебит по нефти увеличивается на 0,9 т/сут. На скважине 727 ранее было проведено радиальное бурение и по радиальным каналам наблюдается опережающее обводнение. При моделировании комплексного воздействия (одновременно на добывающей и нагнетательной скважинах), а именно ВПП на скв. 779 и водоизоляционных работ на скв. 727 с применением гелеобразующего состава, по добывающим скважинам в течение 24 месяцев обводненность снижается более чем на 6,9 %.

Заключение

Дана оценка результатов выполненных на нефтяных месторождениях Пермского Прикамья водоизоляционных и потоковыравнивающих работ на скважинах. Отмечена более высокая эффективность применения для карбонатных коллекторов Ножовской группы месторождений осадкогелеобразующего состава на основе технических лигносульфонатов. Выполнено гидродинамическое моделирование эффективного комплексного воздействия для нагнетательной и добывающей скважин на участке турнейской залежи Березовского месторождения. Снижение обводненности по результатам моделирования через 24 месяца составило 6,9 %, дополнительная добыча нефти 880 т.

- Hou J., Luo M., Zhu D. Foam-EOR method in fractured-vuggy carbonate reservoirs: mechanism analysis and injection parameter study // Journal of Petroleum Science and Engineering. – May 2018. – V. 164. – P. 546–558.
- Поплыгина И.С. Возможности повышения эффективности разработки залежи с высоковязкой нефтью на территории Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13. – № 11. – С. 57–66.
- Гладких Е.А., Хижняк Г.П. Результаты исследований водоизоляционного состава на керновой модели слоисто-неоднородного пласта // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 11. – С. 118–121.
- Строганов М.А. Технологии выравнивания профиля приемистости нагнетательных скважин с применением кремнийорганических тампонажных материалов группы АКОР // Нефть. Газ. Инновации. – 2016. – № 4. – С. 69–73.
- Абилхаиров Д.Т., Альмухаметова Э.М., Владимиров И.В. Результаты внедрения технологии выравнивания профиля приемистости с применением Геллана в качестве тампонирующего агента // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 65–69.
- Хасанов И.М. Результаты применения технологий по выравниванию профилей приемистости (ВПП) нагнетательных скважин на месторождениях АО «Варьеганнефтегаз» // Нефть. Газ. Инновации. – 2015. – № 7. – С. 28–33.
- 12. Юшков И.Р., Цветков Г.А. Итенсификация добычи высоковязкой нефти Опалихинского месторождения // Вестник

Пермского университета. Геология. - 2017. - Т. 16. - № 1. - С. 84-90.

- Gao C., Shi J., Zhao F. Successful polymer flooding and surfactant-polymer flooding projects at Shengli Oilfield from 1992 to 2012 // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. - V. 4. - Iss. 1. - March 2014. - P. 1-8.
- Polymer flood application to improve heavy oil recovery at East Bodo / F.R. Wassmuth, W. Arnold, K. Green, N. Cameron // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2009. – V 48 (2). – P. 55–61.
- Integrating genetic algorithm and support vector machine for polymer flooding production performance prediction / J. Hou, Z.-q. Li, X.-l. Cao, X.-w. Song // Journal of Petroleum Science and Engineering. - V. 68. - Iss. 1-2. - September 2009. -P. 29-39.
- 16. Мордвинов В.А., Поплыгин В.В., Поплыгина И.С. Варианты полимерного заводнения залежи с высоковязкой нефтью // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14. – № 14. – С. 39–51.
- 17. Oilfield reservoir souring during waterflooding: a case study with low sulphate concentration in formation and injection waters /

A.N. Cavallaro, M.E.G. Martinez, H. Ostera, H. Panarello, R.R. Cordero // Proc. – SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. –2005. – SPE 92959. – P. 131–142.

- Водоизоляционные работы в условиях конусообразования / А.В. Распопов, А.С. Казанцев, С.А. Кондратьев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 118–120.
- Опыт и перспективы применения технологий ограничения водопритока на месторождениях Пермского края / А.В. Распопов, А.С. Казанцев, Д.В. Андреев, И.В. Аверина, Д.Д. Сидоренко, С.Н. Глазырин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 9. – С. 41-45.
- 20. Антонов Ю.Ф., Мордвинов В.А Исследование алюмосодержащих составов для регулирования профилей приемистости скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 9–10. С. 57–60.
- Антонов Ю.Ф., Мордвинов В.А. Результаты обработок нагнетательных скважин Усть-Балыкского месторождения осадкообразующим составом // Наука – производству. – 2006. – № 1. – С. 37–38.

Поступила 28.02.2019 г.

Информация об авторах

Поплыгина И.С., аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

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

UDC 622.276

USING A GEL-FORMING COMPOSITION TO REDUCE THE WATER REHABILITATION OF OIL WELLS WITH HIGH-VISION OIL

Irina S. Poplygina¹,

davydova_irina@bk.ru

Viktor A. Mordvinov¹,

mva44@bk.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

Relevance. Flooding of producing wells is a natural process in oil field exploration. Well irrigation is primarily affected by reservoir heterogeneity in terms of filtration properties – stratified (along the section) and zonal (along strike), presence of bottom water, oil-water zones, and increased viscosity of reservoir oil. The front movement speed increases in highly permeable layers, which speeds up the premature watering of the wells.

The aim of the research is to evaluate the most effective waterproofing technologies in the Perm region and explore the possibility of using them in an oil field.

Object: carbonate deposits with high-viscosity oil of the Nozhovskoy group of fields in the Perm region. The average viscosity of reservoir oil for 8 development objects in deposits of the turnaiskii stage (T) is 72,1 MPa*s, with a high value of dissection coefficient (6,23). Average values of water cut and oil recovery ratio reach 1,8. In such conditions, methods of well insulation are widely used.

Methods: analysis of the results of the work performed to reduce well water-cut, hydrodynamic modeling of water insulation works in wells in an oil field.

Results. In the Perm region, higher efficiency while limiting the inflow of water to producing wells by the washed layers for reservoirs with a carbonate reservoir is noted for gelling and sedimentation technologies. In injection wells, work on alignment of injectivity profiles was carried out mainly with the use of cements, resins and polyacrylamide. The high efficiency of use was shown by the technology with sediment- and gelling components based on lignosulfonates. The authors have simulated the operation of the element of the reservoir using sedimentary and gelling agents for the Berezovsky oil field site. It was believed that the pickup of the upper interval will decrease by 82 % during flooding works. For producing wells during the year, the water cut decreases by 3...15 %, and the total oil flow rate increases by 0,9 t/day.

Key words:

Water cut, waterproofing, sediment-forming technologies, lignosulfonates.

REFERENCES

- Liang S., Liu Y., Zhang N., Zeng B. Study on the influence of injection/production type and well pattern and spacing on producing degree of thin and poor layers. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 1 September 2018, vol. 8, Iss. 3, pp. 861–870.
- 2. Kudryashova D.A. Use of probabilistic and statistical methods for determination of the sources of water flow in candidate wells for water shut-off works (on example of the Visean reservoir of the Perm region field). *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 26–36. In Rus.
- Kochneva O.E., Limonova K.N. Evaluation water cutting wells and product Yasnopolyanskaya superhorizon Moskudinskogo deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2014, vol. 13, no. 10, pp. 66–72. In Rus.
- Liu C., Li K., Tian X., Zhao G., Chen Y., Mahlalela B.M. Experimental studies on production performance of oil reservoirs with bottom water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, January 2019, vol. 172, pp. 527–537.
- Min H., Chen L., Wang L., Zhang L., Chen J. Characteristics and mechanism of water production for fractured vuggy carbonate reservoirs, Halahatang Oilfield. *Journal of Southwest Petroleum University*, 1 February 2017, vol. 39, Iss. 1, pp. 114–123.
- Hou J., Luo M., Zhu D. Foam-EOR method in fractured-vuggy carbonate reservoirs: Mechanism analysis and injection parameter study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, May 2018, vol. 164, pp. 546-558.
- Poplygina I.S. Opportunities of improved development of highviscosity oil pool in Perm kray. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2014, vol. 13, no. 11, pp. 57–66. In Rus.

- Gladkikh E.A., Khizhniak G.P. Results of research of waterproofing composition on a core model of a layered heterogeneous. *Oil Industry*, 2017, no. 11, pp. 118–121. In Rus.
- Stroganov M.A. Tekhnologii vyravnivaniya profilya priemistosti nagnetatelnyh skvazhin s primeneniem kremniyorganicheskikh tamponazhnykh materialov gruppy AKOR [Technology of leveling injectivity profile of injection wells with the use of silicone tampo-materials of the AKOR]. *Neft. Gas. Novatsii*, 2016, no. 4, pp. 69–73.
- Abilkhairov D.T., Almukhametova E.M., Vladimirov I.V. Results of applying new technology injectivity profile alignment of gellan as agent plugging. *Oil and gas business*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 65–69. In Rus.
- 11. Khasanov I.M. Rezultaty primeneniya tekhnologiy po vyravnivaniyu profiley priemistosti (VPP) nagnetatelnykh skvazhin na mestorozhdeniyakh AO «Vareganneftegaz» [Results of applying technologies for leveling injectivity profiles (WFP) of injection wells at the fields of Varioganneftegaz JSC]. *Neft. Gas. Novatsii*, 2015, no. 7, pp. 28–33.
- Yushkov I.R., Tsvetkov G.A. Intensification of highly-viscous oil recovery at the Opalikhinskoe field. *Bulletin of Perm University*. *Geology*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 84–90. In Rus.
- Gao C., Shi J., Zhao F. Successful polymer flooding and surfactant-polymer flooding projects at Shengli Oilfield from 1992 to 2012. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, March 2014, vol. 4, Iss. 1, pp. 1–8.
- Wassmuth F.R., Arnold W., Green K., Cameron N. Polymer flood application to improve heavy oil recovery at East Bodo. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, vol. 48 (2), pp. 55–61.

- Hou J., Li Z.-q., Cao X.-l., Song X.-w. Integrating genetic algorithm and support vector machine for polymer flooding production performance prediction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, September 2009, vol. 68, Iss. 1–2, pp. 29–39.
- Mordvinov V.A., Poplygin V.V., Poplygina I.S. Methods of polymer flooding of high-viscosity oil pools. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2015, vol. 14, no. 14, pp. 39–51. In Rus.
- Cavallaro A.N., Martinez M.E.G., Ostera H., Panarello H., Cordero R.R. Oilfield reservoir souring during waterflooding: A case study with low sulphate concentration in formation and injection waters. *Proceedings – SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, 2005, no. SPE 92959, pp. 131–142.
- Raspopov A.V., Kazantsev A.S., Kondratev S.A. Water shutoff treatment under water coning. *Oil Industry*, 2015, no. 11, pp. 118-120. In Rus.
- Raspopov A.V., Kazantsev A.S., Andreev D.V., Averina I.V., Sidorenko D.D., Glazyrin S.N. Experience and prospects of application of water inflow limitation in the firlds of Perm region. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2016, no. 9, pp. 41–45. In Rus.
- Antonov Yu.F., Mordvinov V.A Research of aluminum-containing compositions for the regulation of wells acceptance profile. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2005, no. 9–10, pp. 57–60. In Rus.
- Antonov Yu.F., Mordvinov V.A. Rezultaty obrabotok nagnetatelnykh skvazhin Ust-Balykskogo mestorozhdeniya osadkoobrazuyushchim sostavom [Results of the cutting well handling of the Ust-balyk deposit with a drain formulating composition]. Nauka - proizvodstvu, 2006, no. 1, pp. 37-38.

Received: 28 February 2019.

Information about the authors

Irina S. Poplygina, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University.

Viktor A. Mordvinov, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.276

КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ МНОГОПЛАСТОВЫХ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Пономарёв Александр Иосифович¹,

pnmrv@mail.ru

Ситдиков Рустам Фадисович²,

SitdikovRF@kchn.ru

Ибатулин Артур Адикович^{1,3},

AAlbatulin@purneftegaz.ru

Федоров Алексей Эдуардович^{4,3},

AEFedorov@purneftegaz.ru

Муслимов Булат Шамильевич⁵,

MuslimovBS@ufanipi.ru

- ¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г.Уфа, ул. Космонавтов, 1.
- ² ООО «Харампурнефтегаз», Россия, 629830, г. Губкинский, территория панель 1, 3.
- ³ ООО «РН-Пурнефтегаз», Россия, 629830, г. Губкинский, микрорайон 10, 3.
- ⁴ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, пр. Ленинский, 65, корп. 1
- ⁵ ООО «РН-УфаНИПИнефть», Россия, 450103, г. Уфа, ул. Сочинская, 12.

Актуальность. С целью снижения капитальных затрат и сокращения времени выработки запасов газа и конденсата многопластового газоконденсатного месторождения актуальной задачей является обоснование технологии одновременной разработки различных по ресурсно-энергетическому потенциалу и/или фильтрационно-емкостным свойствам эксплуатационных объектов с подачей газа в одну газосборную сеть. Решение этой задачи актуально как на стадии проектирования, так и в зрелой стадии разработки месторождения на режиме истощения пластовой энергии. В условиях резкого различия ресурсно-энергетического потенциала и фильтрационно-емкостных свойств разрабатываемых объектов низконапорные скважины при определенном противодавлении в системе сбора газа прекращают фонтанирование и переводятся в бездействующий фонд до снижения линейного давления к необходимому уровню.

Цель: обоснование комплексных технологических решений, направленных на повышение эффективности разработки многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений с единой газосборной сетью.

Объекты: многопластовые газовые и газоконденсатные месторождения, содержащие в геологическом разрезе разобщенные и различные по ресурсно-энергетическому потенциалу и фильтрационно-емкостным свойствам выделенные эксплуатационные объекты.

Методы: анализ текущего состояния разработки газовых эксплуатационных объектов Губкинского месторождения, аналитические расчеты технологических режимов работы низконапорных скважин, проведение опытно-промышленных испытаний на газовых скважинах Губкинского месторождения, технико-экономический анализ результатов применения предложенных технологий.

Результаты. Произведен анализ текущего состояния Губкинского месторождения, характеризуемого высокой дифференциацией текущих пластовых давлений по продуктивным пластам. Предложены комплексные решения по обеспечению совместной разработки эксплуатационных объектов с подачей газа в общую газосборную сеть, обеспечивающие устойчивые режимы работы скважин и основанные на регулировании устьевого давления различными техническими устройствами. Произведена технико-экономическая оценка влияния представленных комплексных технологических решений на эффективность разработки нижнемеловых пластов Губкинского месторождения.

Ключевые слова:

Разработка многопластовых газовых месторождений, модульные компрессорные установки, газоструйные аппараты, многопластовые залежи, опытно-промышленные испытания.

Введение

На технико-экономическую эффективность разработки многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений с различными ресурсноэнергетическими потенциалами и/или фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) продуктивных пластов решающее влияние оказывают обоснование системы разработки и системы поверхностного обустройства.

В случаях нескольких эксплуатационных объектов разработки вариант разбуривания каждого объекта самостоятельной сеткой скважин и проектирование раздельной газопроводной сети является, как правило, наименее рентабельным либо нерентабельным ввиду больших капиталовложений. Чаще предпочтительным оказывается вариант поверхностного обустройства с общей газосборной сетью и реализацией стратегии поэтапного ввода в разработку объектов. В зависимости от ресурсно-энергетического потенциала, составов газа, геолого-физических характеристик и других параметров рассматриваются различные системы разработки [1–5 и др.].

Среди представленных стратегий поэтапного ввода в разработку объектов стоит отметить способ, согласно которому промышленное освоение месторождения начинают с нижних залежей газа, имеющих более высокое начальное пластовое давление, а вышезалегающие залежи вводят в эксплуатацию, когда текущее устьевое давление скважин, дренирующих нижние залежи, снизится до начального устьевого давления скважин, дренирующих вышезалегающие залежи [1, 5]. Реализация данного способа возможна в условиях отсутствия ограничивающих критериев, связанных с различием состава газа групп пластов, их коллекторских и прочностных свойств. Достоинством способа является возможность совместной эксплуатации объектов с общей газосборной (трубопроводной) сетью. Стоит также отметить, что в процессе бурения на нижние горизонты возможно уточнение геологического строения и испытание транзитных объектов, что позволит снять риски, связанные с рентабельностью долгосрочных инвестипий.

Очевидным недостатком данного способа является увеличение срока разработки месторождения в связи с отложенным вводом в эксплуатацию вышележащих объектов и, как следствие, снижение уровней добычи газа и экономической эффективности реализации проекта в целом.

При совместной сетке скважин регулирование процесса отбора запасов отдельно по каждому пласту возможно осуществить с помощью технологии одновременно-раздельной эксплуатации объектов (ОРЭ). Такая технология в основном применяется на нефтяных месторождениях, ряд работ [6–10] посвящен анализу вариантов ее применения на газовых месторождениях. ОРЭ применяется с целью снижения затрат на сооружение скважин, однако усложнение конструкции скважин также приводит к существенному росту эксплуатационных затрат [6], что в долгосрочной перспективе может не привести к увеличению рентабельности проекта в целом. Кроме того, одной скважиной эксплуатируют в большинстве случаев только два пласта, эксплуатация более трех пластов практически не применяется.

В связи с необходимостью снижения капитальных затрат и сокращения времени выработки запасов актуальной задачей для многопластовых месторождений является создание способа одновременной разработки различных по ресурсно-энергетическому потенциалу и/или ФЕС эксплуатационных объектов многопластового газового месторождения с общей газосборной сетью.

Некоторые особенности разработки газовых и газоконденсатных объектов Губкинского месторождения

Решение задачи повышения технико-экономических показателей актуально не только на стадии проектирования, но и в процессе разработки многопластового месторождения. Рассмотрим текущее состояние разработки газовых объектов Губкинского месторождения, геологический разрез которого представлен на рис. 1.

Согласно проектной документации, выработку запасов свободного газа Губкинского месторождения было запланировано осуществлять поэтапно, начиная с нижних эксплуатационных объектов. По достижении проектных коэффициентов газоотдачи по нижним объектам планировалось введение в эксплуатацию верхних объектов. В процессе разработки для поддержания рентабельных уровней добычи и обеспечения необходимой загрузки поверхностного технологического оборудования был произведен частичный опережающий ввод в разработку верхних объектов.

Вследствие ввода новых скважин увеличение добычи газа приводит к росту линейного давления в газосборной сети. В условиях значительного различия ресурсно-энергетического потенциала и ФЕС объектов разработки низконапорные скважины нижних пластов ухудшенными продуктивными характеристиками при определенном противодавлении в системе сбора прекращают фонтанирование и переводятся в бездействующий фонд. В процессе дальнейшей разработки месторождения часть таких скважин может быть введена в эксплуатация при условии снижения линейного давления в газосборной сети (шлейфах и коллекторах) до требуемого значения. Бездействие скважин приводит к неравномерной выработке запасов продуктивных пластов и ухудшению показателей разработки месторождения.

Для извлечения остаточных запасов из залежей, эксплуатация скважин которых ограничена термодинамическими условиями запроектированной инфраструктуры, необходима разработка новых технологических решений.



Fig. 1. Geological section of the Gubkinsky multilayer deposit

Разработка способов повышения эффективности добычи газа на многопластовых газовых месторождениях

Для повышения эффективности добычи газа и конденсата на многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений и решения поставленной выше задачи предложен комплексный подход, включающий в себя ряд технических способов, обеспечивающих совместную разработку различных по энергетическому потенциалу и ФЕС эксплуатационных объектов при работе скважин в общую газосборную сеть. Предлагаемые решения основаны на регулировании давления на устье газовых скважин разных объектов с помощью различных технических устройств.

Для одновременной выработки запасов высокопотенциальных и низкопотенциальных объектов предлагается способ разработки многопластовых газовых месторождений, который реализуется следующим образом (рис. 2): разработка залежей/эксплуатационных объектов месторождения осуществляется самостоятельной сеткой добывающих скважин - 1, 2, 3 по каждому объекту, обустроенных общей газосборной сетью - 4. Разработка объектов осуществляется одновременно. Регулирование технологических режимов скважин, вскрывших пласты с пониженным ресурсно-энергетическим потенциалом, осуществляется подачей пластового газа с пластовыми примесями на установленную на устье скважин модульную компрессорную установку (МКУ), где реализуется отделение газа от механических примесей и воды. На МКУ производится компримирование газа до необходимого рабочего давления и последующая его подача в общую газосборную сеть (коллектор), где потоки смешиваются и газ по общему коллектору поступает на объекты подготовки скважинной продукции газового промысла (ГП).

При реализации разработанного способа для достижения указанного технического результата предложено использовать известное [11–16] устройство МКУ, которое представляет собой входной сепаратор и блок поршневого компрессора с приводом компрессора и переключающей арматурой.

В качестве примера конкретной реализации рассмотрим перспективы применения способа при проектировании технологической схемы разработки газовых объектов Харампурского месторождения, на котором выделено три газонасыщенных пласта: ПК1, Т, К2 – различных по ресурсно-энергетическому потенциалу и фильтрационно-емкостным свойствам. Основные запасы газа сосредоточены в объектах ПК1 и Т. Пласт ПК1 характеризуется высокой проницаемостью и приурочен к относительно неплотным породам, способным раз-



Рис. 2. Принципиальная схема подключения скважин к единой трубопроводной сети

Fig. 2. Schematic diagram of connecting wells to a single pipeline network



Puc. 3. Схема подключения скважин разных эксплуатационных объектов/пластов к единой трубопроводной сети Харампурского нефтегазоконденсатного месторождения

Fig. 3. Scheme of connecting wells of different operational objects to a single pipeline network of the Kharampursky oil and gas condensate field

рушаться при нарушении установленных технологических режимов. Ввиду низких фильтрационноемкостных свойств для обеспечения устойчивых технологических режимов работы скважин, вскрывших пласт Т и К2, требуются относительно высокие депрессии. С учетом особенностей месторождения предложен вариант подключения скважин разных эксплуатационных объектов/пластов к единой газосборной сети Харампурского нефтегазоконденсатного месторождения (рис. 3).

Применение предлагаемого способа позволяет повысить эффективность разработки многопластового месторождения за счёт увеличения уровней добычи газа и сокращения продолжительности периода разработки месторождения в результате опережающего ввода в разработку пластов Т и К2 с общей газосборной сетью.

Стоит отметить, что для получения положительного экономического эффекта ввиду существенных капитальных затрат на приобретение МКУ реализация данного способа должна обеспечить соответствующую дополнительную добычу газа.

В качестве альтернативного метода реализации одновременной разработки высокопотенциальных

и низкопотенциальных объектов возможно также широкое использование газоструйных аппратов.

Газоструйными аппаратами (ГА) называются устройства, рабочим агентом которых является газ и в которых осуществляется передача кинетической энергии одного потока другому путем непосредственного контакта с образованием смешанного потока [17–20].

На рис. 4 представлена принципиальная технологическая схема эжекторной установки снижения устьевого давления газовых скважин, предложенная в работах [17–19].

За счет разрежения давления, создаваемого на выходе из сопла ГА при истечении через него газа высокого давления (Q_p, P_p), происходит снижение давления на приеме ГА ($Q_{пp}, P_{пp}$), в нашем случае устьевого давления низконапорной газовой скважины. Далее в камере смешения ГА происходит смешение продукций участвующих в процессе скважин и восстановление давления до значения линейного давления в системе сбора ($P_c=P_{лин}$).

Таким образом, ГА выполняет роль компрессора низконапорного газа, используя для этого потенциал скважин с высоким устьевым давлением. Эффективность данного метода подтверждена



Рис. 4. Принципиальная технологическая схема эжекторной установки снижения устьевого давления газовых скважин

Fig. 4. Principal technological scheme of an ejector unit for reducing wellhead pressure of gas wells

опытно-промышленными испытаниями. Опыт реализации технологии в ООО «PH-Пурнефтегаз» представлен в работе [17]. Стоит отметить, комбинирование представленных методов позволит усовершенствовать представленные схемы и снизить капитальные затраты на их реализацию.

Применение комплексных решений для повышения эффективности разработки газоконденсатных группы пластов БП Губкинского месторождения

Проанализируем влияние представленных комплексных технологических решений на эффективность разработки группы пластов БП Губкинского месторождения. Для оценки эффективности были произведены два прогнозных расчета: по базовому варианту и варианту с применением комплексных решений на выбывающих в бездействие скважинах.

Базовый вариант предполагает выбытие ряда газовых скважин в бездействие при невозможности их дальнейшей эксплуатации фонтанным способом и последующую довыработку запасов оставшимися скважинами. Вариант с применением комплексных решений предусматривает дальнейшую эксплуатацию всех скважин, что позволит обеспечить выработку запасов в более короткий период, тем самым повысить эффективность разработки месторождения. Динамика уровней добычи и динамика отборов извлекаемых запасов (ОИЗ) представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Расчет прогнозных вариантов производен аналитическим методом, приведем основные используемые формулы. Динамика пластовых давлений определена на основе уравнения материального баланса [2]. Расчет пластового давления и технологических параметров работы скважин осуществлялся с использованием метода последовательной смены стационарных состояний. Дебит газа добывающих скважин вычислялся по двучленной формуле притока:

$$P_{\rm mn}^2 - P_{\rm sa6}^2 = Aq_{\rm r} + Bq_{\rm r}^2$$

где A, B – коэффициенты фильтрационного сопротивления, МПа²·сут/тыс. м³ и (МПа²·сут/тыс. м³)²; $P_{\rm пл}$ – пластовое давление, МПа; $P_{\rm заб}$ – забойное давление, МПа; $q_{\rm r}$ – дебит газа, тыс. м³/сут.

Определение параметров работающих скважин производилось по формуле Г.А. Адамова [2]:

$$P_{3a\delta}^{2} - P_{y}^{2} e^{2\chi} = \psi q_{r}^{2},$$

где P_y – устьевое давление, МПа; ψ – вспомогательная функция; χ – показатель, определяемый по формуле:

$$\chi = \frac{0,03415\rho_{\rm oth}H}{Z_{\rm cp}T_{\rm cp}},$$

где $\rho_{\rm отн}$ – относительная плотность газа, д. ед.; H– гипсометрическая отметка глубины интервалов перфорации, м; $Z_{\rm cp}$ – средний коэффициент сверхсжимаемости, д. ед.; $T_{\rm cp}$ – средняя по стволу скважины температура, °К.

Значение вспомогательной функции ψ :

$$\psi = 1324\lambda \frac{Z_{\rm cp}^2 T_{\rm cp}^2}{d_{\rm pH}^5} (e^{2\chi} - 1)q_{\rm r}^2$$

где λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; $d_{\rm BH}$ – внутренний диаметр насосно-компрессорных труб, мм.

В качестве ограничивающего критерия фонтанирования скважины принята минимальная скорость потока на забое скважины, необходимая для выноса жидкости, рассчитанная по формуле A.A. Точигина





Fig. 6. Recoverable reserves development

$$v_{\min} = 3.3 \left(\frac{9.8 \theta \rho_{\pi}^2}{\rho_{r}^2 (\rho_{\pi} - \rho_{r})} \right)^{0.25}$$

где v_{\min} – минимальная скорость на забое для выноса жидкости в м/с; ρ_{π} – плотность жидкой фазы, кг/м³; ρ_{r} – плотность газовой фазы в пластовых условиях, кг/м³; θ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Оценка экономической эффективности комплексных решений

Прогнозная оценка экономической эффективности применения МКУ производилась на примере куста газовых скважин № 1 Губкинского месторождения, скважины 1, 2, 3 которого находятся в бездействии по причине прекращения фонтанирования. Вывод скважин из бездействия предусматривается внедрением МКУ. Капитальные затраты 150 млн р., NPV проекта 125 млн р.

Оценка экономической эффективности применения ГА выполнена на основе проведения опытно-промышленных испытаний двух газовых скважин 4 и 5 (высоконапорной и низконапорной) куста 2 Губкинского месторождения. По результатам испытаний, скважина 5 выведена из бездействия. NPV проекта составит 31,5 млн р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коротаев Ю.П. Эксплуатация газовых месторождений. М.: Недра, 1975. – 415 с.
- Закиров С.Н., Лапук Б.Б. Проектирование и разработка газовых месторождений. – М.: Недра, 1974. – 370 с.
- Стрижов Й.Н., Ходанович И.Е. Добыча газа. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 376 с.
- Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. – М.: Струна, 1998. – 628 с.
- Способ разработки многопластовых газовых месторождений: пат. 2377396 Рос. Федерация: 2008137698/03; заявл. 19.09.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36. – 2 с.
- Анализ мирового опыта по освоению трудноизвлекаемых запасов газа и составление плана исследовательских и опытно-промышленных работ для освоения Туронских газовых залежей. Информационный отчет / Рук. темы С.М. Бикбулатов. – Уфа, ООО «РН-УфаНИПИнефть», 2014. – 308 с.
- Boussa M., Hebbal H. Optimizing production gas wells by using a dual completion // Canadian International Petroleum Conference. - Calgary, Canada, 2006. - P. 1-15.
- Methods to improve the efficiency of development of a multi-layer offshore gas condensate field: Thien Ung case study / A. Lubnin, E. Yudin, G. Sansiev, T. Karimov, V. Bondarenko // 187865-MS SPE Conference Paper. – Moscow, Russia, 2017. – P. 1–10.
- Lea J.F., Nickens H.V., Wells M.R. Gas well deliquification. USA: Gulf Professional Publ., 2008. – 588 p.
- Lea J.F., Tighe R.E. Gas well operation with liquid production // Production Operation Symposium. – Oklahoma City, OK, February 27 – March 1, 1983. – P. 1–13.
- Балашова В.Д., Лаптев Е.М., Ковальчук О.Ю. Оптимизация работы газосборной сети на поздней стадии разработки // Газовая промышленность. – 2014. – № 708. – С. 53–55.
- Перспективы применения распределенного компримирования в промысловых системах добычи газа / М.А. Воронцов,

Заключение

Применение модульных компрессорных установок и газоструйных аппаратов в варианте одновременной разработки существенно отличающихся по ресурсно-энергетическому потенциалу и/или фильтрационно-емкостным свойствам эксплуатационных объектов многопластового месторождения с общей газосборной сетью, рассматриваемом в качестве альтернативного варианту поочерёдного ввода в разработку этих объектов, позволяет повысить техникоэкономическую эффективность разработки объектов месторождения за счёт увеличения уровней добычи газа и сокращения срока выработки запасов.

Технология применения газоструйных аппаратов апробирована при проведении опытно-промышленных испытаний на группе газовых скважин Губкинского месторождения. Использование газоструйных аппаратов позволило произвести опережающий ввод в разработку высокопотенциального пласта Губкинского месторождения при одновременном обеспечении устойчивых технологических режимов работы действующих низконапорных газовых скважин, вскрывших низкопотенциальные залежи. Целесообразность применения технологии комплексных решений для добычи газа и конденсата может быть рассмотрена на любой стадии разработки месторождений.

А.А. Ротов, И.В. Марущенко, Е.В. Лаптев // Вести газовой науки. – 2014. – № 4 (20). – С. 164–173.

- Natural gas saver with separator and compressor. Patent U.S., no. 168,841, 1971.
- Libson T.N., Henry J.T. Case histories: identification of and remedial action for liquid loading in gas wells-intermediate shelf gas play // Journal of Petroleum Technology. - April 1980. -V. 32 (4) - P. 685-693.
- A new look at predicting gas well liquid load-up / S.B. Coleman, H.B. Clay, D.V. McCurdy, H.N. Lea // Journal of Petroleum Technology. - March 1991. - V. 43 (3) - P. 329-332.
- Harms L.K. Installing low-cost, low-pressure wellhead compression on tight Lobo Wilcox wells in South Texas: a case history // 2004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, TX, September 26–29, 2004. – P. 1–16
- Обеспечение устойчивых технологических режимов эксплуатации газовых скважин на поздней стадии разработки месторождения с применением устьевых газоструйных аппаратов / А.И. Пономарев, В.С. Вербицкий, А.Э. Федоров, А.А. Ибатулин // Вести газовой науки. – 2018. – № 1. – С. 171–180.
- Федоров А.Э., Вербицкий В.С., Горидько К.А. Экспериментальные исследования и анализ характеристик работы газоструйных аппаратов для добычи нефти и газа из скважин с осложненными условиями эксплуатации // Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE. – М., 2016. – SPE-181956-RU.
- Федоров А.Э., Ибатулин А.А. Повышение эффективности эксплуатации газовых скважин с применением устьевых газоструйных аппаратов // Статья SPE 191733, подготовленная для презентации на Российской нефтегазовой технической конференции и выставке SPE. – М., 2018. – SPE-191733–18RPTC-RU.
- Beg N., Sarshar S. Surface Jet Pumps (SJPs) for enhanced oil & gas production. – United Kingdom: Caltec Ltd, 2014. – 127 p.

Информация об авторах

Пономарёв А.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Ситдиков Р.Ф., начальник управления геологии и лицензирования ООО «Харампурнефтегаз».

Ибатулин А.А., аспирант кафедры разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета; ведущий специалист управления по разработке месторождений ООО «PH-Пурнефтегаз».

Федоров А.Э., аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина; начальник сектора управления повышения производительности резервуаров и геолого-технических мероприятий ООО «PH-Пурнефтегаз».

Муслимов Б.Ш., начальник отдела разработки нефтегазовых залежей ООО «РН-УфаНИПИнефть».

UDC 622.276

COMPLEX SOLUTIONS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF DEVELOPMENT OF MULTI-LAYER GAS AND GAS-CONDENSATE FIELDS

Aleksandr I. Ponomarev¹, pnmrv@mail.ru

Rustam F. Sitdikov², SitdikovRF@kchn.ru

Artur A. Ibatulin^{1,3}, AAIbatulin@purneftegaz.ru

Aleksey E. Fedorov^{4,3}, AEFedorov@purneftegaz.ru

Bulat Sh. Muslimov⁵,

MuslimovBS@ufanipi.ru

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

² LLC Kharampurneftegaz,3, territory panel 1, Gubkinsky, 629830, Russia.

³ LLC Rosneft-Purneftegaz,3, microdistrict 10, Gubkinsky, 629830, Russia.

⁴ National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

⁵ LLC Rosneft-UfaNIPIneft,12, Sochinskaya street, Ufa, 450103, Russia.

Relevance. To reduce capital costs and time of developing gas reserves and condensate from a multilayer gas condensate field, an urgent task is to justify the technology of simultaneous development of different by potential and/or filtration-capacitive properties reservoirs with gas supply to one gas gathering network. The solution of this problem is relevant both at the design stage and at the mature stage of field development in the mode of depletion of reservoir energy. Under the conditions of a sharp difference in the resource-energy potential and reservoir properties of the developing reservoirs, low-pressure wells with a certain backpressure in the gas gathering system stop flowing and are transferred to an inactive fund until the linear pressure decreases to the required level.

The aim of the research is the rationale of integrated technological solutions aimed at improving the development of multilayer gas and gas condensate fields with a single gas gathering system.

Objects: multilayer gas and gas condensate fields, which contain in their geological section the fragmented and different in terms of resource and energy potential and filtration-capacitive properties selected operational objects.

Methods: analysis of the current state of developing gas production facilities of the Gubkinskoe field, analytical calculations of technological modes of operation of low-pressure wells, conducting pilot tests at gas wells of the Gubkinskoe field, a feasibility study of the results of applying the proposed technologies.

Results. The authors have analyzed the current state of the Gubkinskoe field, characterized by a high differentiation of the current reservoir pressures in the reservoirs. Integrated solutions were proposed to ensure joint development of production facilities with gas supply to the general gas-gathering network, ensuring stable operation modes of the wells and based on controlling wellhead pressure by various technical devices. The technical and economic assessment of the impact of the presented complex technological solutions on the development efficiency of the reservoirs of the lower cretaceous deposits of the Gubkinskoe field was made.

Key words:

Development of multilayer gas fields, modular compressor stations, gas-jet devices, multi layered reservoir, pilot-scale tests.

REFERENCES

- 1. Korotaev Yu.P. *Ekspluatatsiya gazovykh mestorozhdeniy* [Exploitation of gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 415 p.
- Zakirov S.N., Lapuk B.B. Proektirovanie i razrabotka gazovykh mestorozhdeniy [Design and development of gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 370 p.
- Strizhov I.N., Khodanovich I.E. Dobycha gaza [Gas production]. Moscow; Izhevsk, Institute of complex researches Publ., 2003. 367 p.
- Zakirov S.N. Razrabotka gazovykh, gazokondensatnykh i neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy [Development of gas, gas condensate and oil and gas condensate fields]. Moscow, Struna Publ., 1998. 628 p.
- Gafarov N.A., Gordeev V.N., Menshikov S.N. Sposob razrabotki mnogoplastovykh gazovykh mestorozhdeniy [Method of development of multilayer gas fields]. Patent RF, no. 2008137698/03, 2009.

- 6. Analiz mirovogo opyta po osvoeniyu trudnoizvlekayemykh zapasov gaza i sostavlenie plana issledovatelskikh i opytno-promyshlennykh rabot dlya osvoeniya Turonskikh gazovykh zalezhey. Informatsionny otche. [Analysis of world experience in development of hard to recover gas reserves and drawing up a plan of research and pilot works for development of Turon gas deposits.]. Ufa, RN-UfaNIPIneft Publ., 2014. 308 p.
- Boussa M., Hebbal H. Optimizing production gas wells by using a dual completion. *Canadian International Petroleum Conference*. Calgary, Canada, 2006. pp. 1–15.
- Lubnin A., Yudin E., Sansiev G., Karimov T., Bondarenko V. Methods to improve the efficiency of development of a multi-layer offshore gas condensate field: Thien Ung case study. 187865-MS SPE Conference Paper. Moscow, Russia, 2017. pp. 1–10.
- 9. Lea J.F., Nickens H.V., Wells M.R. Gas well deliquification. USA, Gulf Professional Publ., 2008. 588 p.
- Lea J.F., Tighe R.E. Gas well operation with liquid production. Production Operation Symposium. Oklahoma City, OK, February 27 – March 1, 1983. pp. 1–13
- Balashova V.D., Laptev E.M., Kovalchuk O.Yu. Optimizatsiya raboty gazosbornoy seti na pozdney stadii razrabotki [Optimization of gas gathering pipeline system at the late stage of development]. *Gas industry*, 2014, no. 708, pp. 53–55.
- Vorontsov M.A., Rotov A.A., Marushchenko I.V., Laptev E.V. Prospects of use of distributed compression in field gas production systems. *News of gas science*, 2014, no. 4 (20), pp. 164–173. In Rus.
- 13. Tipton D.F., Jeffers L.R. Natural gas saver with separator and compressor. Patent U.S., no. 168,841, 1971.

- Libson T.N., Henry J.T. Case histories: identification of and remedial action for liquid loading in gas wells-intermediate shelf gas play. *Journal of Petroleum Technology*, April 1980, vol. 32 (4), pp. 685-693.
- Coleman S.B., Clay H.B., McCurdy D.V., Lea H.N. A new look at predicting gas well liquid load-up. *Journal of Petroleum Technology*, March 1991, vol. 43 (3), pp. 329-332.
- Harms L.K. Installing low-cost, low-pressure wellhead compression on Tight Lobo Wilcox wells in South Texas: a case history. 004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, TX, September 26–29, 2004. pp. 1–16.
- 17. Ponomarev A.I., Verbitsky V.S., Fedorov A.E., Ibatulin A.A. Provision of stable technological modes of operation of gas wells at a late stage of field development using wellhead gas-jet apparatuses. *News of gas science*, 2018, no. 1, pp. 171–180. In Rus.
- Fedorov A.E., Verbitsky V.S., Goridko K.A. Experimental studies and analysis of gas-jet device's operation characteristics for oil and gas production in abnormal operating conditions. SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, 2016. SPE-181956-MS.
- Fedorov A.E., Ibatulin A.A. Increasing of operation efficiency of low pressure gas wells by using of gas-jet device's. SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, 2018. SPE-191733-18RPTC-MS.
- 20. Beg N., Sarshar S. Surface Jet Pumps (SJPs) for Enhanced Oil & Gas Production. United Kingdom, Caltec Ltd, 2014. 127 p.

Received: 29 November 2018.

Information about the authors

Aleksandr I. Ponomarev, Dr. Sc., professor, head of development and exploitation of gas and oil-gas-condensate fields department, Ufa State Petroleum Technological University.

Rustam F. Sitdikov, head of the Geology and Licensing Department, LLC Kharampurneftegaz.

Artur A. Ibatulin, leading specialist of Fields Development Department, LLC Rosneft-Purneftegaz, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

Aleksey E. Fedorov, head of section, LLC Rosneft-Purneftegaz, postgraduate student, Petroleum Reservoir Engineering Department of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University).

Bulat Sh. Muslimov, head of Oil and Gas Fields Department, LLC Rosneft-UfaNIPIneft.

УДК 621.43

ВЛИЯНИЯ ВЫСОТ ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ НА ГАЗОДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ

Пассар Андрей Владимирович,

passar av@mail.ru

Вычислительный центр ДВО РАН, Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

Актуальность исследования определяется необходимостью создания эффективных газотурбинных двигателей, применяемых в отрасли нефтегазового комплекса.

Цель: при помощи модели пространственного течения газа в центростремительной турбине исследовать воздействие расчетного режима проектирования турбины на газодинамику течения в её рабочем колесе.

Объект: центростремительная турбина энергоустановки малой мощности применяемого в отрасли нефтегазового комплекса. **Методы.** Для описания течения в турбине применяются уравнения пространственного потока. Для приведения этой системы уравнений к системе уравнений по двум координатам применяется метод прямых. Полученная система уравнений двумерного течения решается методом последовательных приближений.

Результаты. На основе метода оптимального проектирования спроектированы рабочие колеса центростремительной турбины для различных расчетных давлений газа на входе. Результаты проектирования показали, что с увеличением расчетного давления газа на входе в турбины уменьшаются площади входного и выходного сечений проточной части. На базе одномерной модели течения в турбинах показано влияние высот лопатки рабочего колеса на КПД и мощность турбины. В результате проведения одномерного расчета можно констатировать, что с увеличением высот лопатки рабочего колеса взрастает КПД турбины, а эффективная мощность падает. Впервые для центростремительной турбины показано воздействие расчетного давления газа на входе в турбину, на газодинамику течения в её рабочем колесе. В результате проведеных исследований установлено, что с уменьшением расчетного давления газа на входе в турбины, на газодинамику течения в её рабочем колесе. В результате проведенных исследований установлено, что с уменьшением расчетного давления газа на входе в турбину и а газодинамику течения в её рабочем колесе. В результате проведения в турбины показано воздействие расчетного давления газа на входе в турбины показано воздействие расчетного давления газа на входе в турбини показано воздействие расчетного давления с уменьшением расчетного давления газа на входе в турбину возрастает область отрыва течения в рабочем колесе. Линия области отрыва течения в рабочем колесе. Линия области отрыва течения поределена при условии равенства нулю меридианной проекции относительной скорости. Представлены экспериментальный и расчетный профиль скоростей за проточной частью турбины. При сопоставлении расчетного профиля скоростей стечения в ней.

Ключевые слова:

Площадь проходного сечения, центростремительная турбина, КПД турбины, микротурбина, поле скоростей, линия тока, высота лопатки, энергоустановка.

Введение

В настоящее время в отрасли нефтегазового комплекса используются энергоустановки производства компании «Дрессер-Рэнд». В отдельную группу энергетических установок следует отнести микротурбины малой электрической мощностью [1-3], производимые фирмой «Кэпстоун», применяемые в отрасли нефтегазового комплекса. Топливом для них может служить природный газ, а также попутный нефтяной газ. Применение современных микротурбин в нефтяной промышленности позволяет утилизировать попутный нефтяной газ с низким содержанием сероводорода.

Одним из основных узлов микротурбинного двигателя является одноступенчатая центростремительная турбина. Центростремительная конструкция энергоустановок обеспечивает надежность, компактность и высокую производительность.

Работа, направленная на повышение эффективности центростремительной турбины энергоустановки, является актуальной. В [4–6] представлена методика определения расчетного режима проектирования турбины. Однако статьи, направленной на исследование влияния расчетного режима на газодинамику течения в проточной части турбины, до настоящего времени не было. Цель настоящей работы: при помощи модели двумерного течения невязкого сжимаемого газа в проточной части центростремительной турбины исследовать воздействие расчетного режима проектирования турбины на газодинамику течения в её проточной части.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1. Используя метод оптимального проектирования, выполнен проектный расчет центростремительной турбины для различных расчетных режимов и построены проточные части.
- 2. Используя одномерную модель течения в турбине, выполнен расчет характеристик турбин и проведена его экспериментальная проверка.
- 3. Выполнен расчет двумерного течения невязкого сжимаемого газа в проточных частях турбин, и проведена его экспериментальная проверка.
- 4. На основе выполненного расчета выбран оптимальный расчетный режим и соответствующие ему проточные части.

Математическая модель исследования

На сегодняшний день на рынке программного обеспечения имеется множество коммерческих пакетов вычислительной гидродинамики [7–14], позволяющих производить расчет пространственного течения в турбинах. Использование этих пакетов заключается в решении численными методами двумерных и трехмерных уравнений, описывающих течение в турбомашинах. Эти пакеты включают разнообразные модели турбулентности. В работе [15] рассмотрено использование пакета ANSYS *CFX* для решения уравнений двумерного и трехмерного течения в малорасходной осевой турбине. При этом время расчета двумерного течения в турбине занимает в среднем около 2 ч. Расчет производился на компьютере *Core i 5*, с тактовой частотой 2,7 ГГц и оперативной памятью 16 Гб.

В работах [16–18] рассмотрен расчет двумерного вихревого течения невязкого сжимаемого газа в полости центростремительной турбины с радиусом крылатки 70 мм. При этом время расчета на персональной машине занимает в среднем около 0,32 с.

Таким образом, по затратам машинного времени применение математической модели двумерного вихревого течения невязкого сжимаемого газа для моделирования течения в турбине эффективнее полноценного *CFD*-моделирования.

Математическая модель двумерного течения газа в центростремительной турбине подробно описана в работах [16–18]. Для описания течения применяются следующие уравнения, записанные в системе координат, связанной с проточной частью: движения, неразрывности, первого закона термодинамики. Отличительная черта этой модели – это то, что в ней для описания течения в проточной части турбины применяются уравнения для невязкого газа, при этом потери энергии в полости турбины учитываются косвенно, через расчет энтропии. А энтропия в свою очередь рассчитывается через коэффициент потерь в рабочем колесе.

Для приведения системы уравнений пространственного течения к системе уравнений по двум координатам применяется метод прямых [19]. Принято предположение об осевой симметрии потока [20, 21]. Частные производные заменяются конечными разностями [22, 23]. Полученная система уравнений двумерного течения решается методом итераций [24, 25]. Алгоритм решения рассматриваемой задачи подробно рассмотрен в работе [17].

Граничные условия.

- 1. Линии меридионального контура линии тока.
- 2. Вход в проточную часть: течение вихревое, все частные производные по длине линии тока равны нулю.
- 3. Выход из проточной части: течение вихревое, все частные производные по длине линии тока равны нулю.

Проектирование проточной части

Для проектирования проточной части задаются следующие параметры: расход газа, проходящего через проточную часть; частота вращения турбины; давление торможения перед турбиной.

Число оборотов определяется при расчете оптимальных параметров турбины [26]. Принятые параметры четырех расчетных режимов приведены в таблице.

Таблица.	Параметры расчетных режимов
Table.	Parameters of the calculated modes

Параметры	Режим/Mode			
Characteristis	1	2	3	4
Расход G_t , кг/с Consumption G_t , kg/s	0,45	0,45	0,45	0,45
Давление заторможенного потока на входе в ступень Pressure of the inhibited flow at the stage inlet p_0^* , MPa	0,18	0,20	0,22	0,24
Степень понижения давления Pressure reduction degree $\pi_{t,r}=p_0^*/p_2$	1,7	1,89	2	2,26
Частота вращения $n_{\text{тк}}$, мин ⁻¹ Rotational speed n_{tk} , min ⁻¹	35860	39880	43660	46860

Используя метод оптимального проектирования [26], выполним проектный расчет проточных частей для определенных ранее расчетных режимов (таблица). Результаты проектирования представлены на (рис. 1). Угол закрутки лопаток направляющего аппарата $\alpha_1 = 18^\circ$. Угол закрутки лопаток рабочего колеса на среднем радиусе $\beta_2 = 36^{\circ}$. Лопатки рабочего колеса для обеспечения прочности и жесткости имеют радиальное направление в сечениях плоскостями, перпендикулярными оси колеса, а также малую толщину на периферии при значительной толщине у корня. Конфигурация линий меридионального контура представляет собой эллиптические кривые [17]. Также на рис. 1 для сравнения приведена проточная часть рабочего колеса штатной турбины турбокомпрессора ТКР-14.

На рис. 1 турбина № 1 спроектирована на режим № 1, турбины № 2 – на режим № 2, турбина № 3 – на режим № 3, турбина № 4 – на режим № 4. Далее будем их называть опытными турбинами. Количество лопаток рабочего колеса для турбины № 1 $z_{\rm pk}$ =12, для турбины № 2 $z_{\rm pk}$ =12, для турбины № 2 $z_{\rm pk}$ =13. Степень радиальности для всех рабочих колес $\mu = R_{\rm av}/R_{\rm l}$ =0,52.

Как показали результаты проектирования, с увеличением расчетного давления газа на входе в турбину уменьшаются площади проходного сечения на входе и выходе из рабочего колеса (рис. 1), а также увеличивается оптимальное число оборотов турбины, определенное с помощью метода оптимального проектирования (таблица).

Определение КПД турбин

Для оценки проточных частей турбин, используя одномерную модель, выполнен расчет следующих зависимостей: КПД турбины от коэффициента напора $\eta_r = f(\bar{H_r})$ (рис. 2, *a*) и мощность турбины в функции коэффициента напора $N_r = f(\bar{H_r})$ (рис. 2, *б*). Одномерная модель для расчета турбины основана на использовании уравнения энергии, расхода и моментов количества движения. Для определения





Рис. 1. Результаты оптимального проектирования: а) турбина № 1, режим 1; б) турбина № 2, режим 2; в) турбина № 3, режим 3; г) турбина № 4, режим 4; д) штатная турбина ТКР-14С-27

Fig. 1. Results of optimal design: a) turbine Nº 1, mode 1; b) turbine Nº 2, mode 2; C) turbine Nº 3, mode 3; d) turbine Nº 4, mode 4; d) regular turbine TKR-14S-27

потерь энергии в проточной части используются экспериментальные зависимости [27]. Коэффициент напора здесь принимается $\bar{H}_r=2h_{a,r}/u_1^2$, $h_{a,r}$ – текущее значение изоэнтропийного теплоперепада; u_1 – окружная скорость на входе в рабочее колесо. Из результатов расчета зависимостей $\eta_r=f(\bar{H}_r)$, $N_r=f(\bar{H}_r)$ следует:

- На рассмотренном интервале изменения H_r увеличение площади проходного сечения на входе и выходе из рабочего колеса приводит к увеличению эффективности турбины (рис. 2, *a*).
- На рассмотренном интервале изменения H_τ увеличение площади проходного сечения на входе и выходе из рабочего колеса приводит к уменьшению эффективной мощности турбины (рис. 2, *δ*).
- 3. На рассмотренном интервале изменения напора опытные турбины эффективнее штатной (рис. 2, *a*).

Проверка адекватности одномерной модели расчета турбины, выполненная путем сравнения расчетных зависимостей $\eta_{\tau} = f(\bar{H}_{\tau})$, $N_{\tau} = f(\bar{H}_{\tau})$ для штатной турбины с экспериментальными данными, показала, что ошибка счета не превосходит величины 2 % (рис. 2).

На основании одномерного расчета можно сделать следующий вывод: с уменьшением площади проходного сечения на входе и выходе из рабочего колеса КПД турбины падает, а эффективная мощность растет за счет увеличения степени понижения давления и оптимальной частоты вращения турбины.

Результаты расчетов

Результаты одномерного расчета в точках максимума КПД на зависимостях $\eta_r = f(H_r)$ (рис. 2, *a*) использовались в качестве начального приближения для двумерного расчета. Для выполнения дву-



Рис. 2. Влияние расчетного режима на КПД и мощность: а) КПД турбины; б) эффективная мощность; 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 2; 3 – турбина № 3; 4 – турбина № 4; 5 – расчетная характеристика штатной турбины ТКР-14С-27; 6 – экспериментальная характеристика турбины ТКР-14С-27

Fig. 2. Impact of the design mode on efficiency and power: a) turbine efficiency; b) effective power; 1 – turbine № 1; 2 – turbine № 2; 3 – turbine № 3; 4 – turbine № 4; 5 – design characteristics of the turbine TKR-14S-27; 6 – experimental characteristics of the turbine TKR-14S-27

мерного расчета течения газа в проточной части центростремительной турбины составлена программа на языке программирования МАТLAB [28].

Параметры сетки. Для проведения расчета проточная часть разбивается на сетку. Для этого проводим семейство прямых l к внешней линии меридионального контура (рис. 3). После этого наносим по принципу равных кольцевых площадей линии тока s (на рис. 3 показаны тонкими линиями). Для обеспечения сходимости приближений существенно, чтобы l мало отличалась от нормали к линии тока. Выполнение этого условия совместно с требованием $\Delta l \leq \Delta s$ практически обеспечивает сходимость последовательных приближений.

На рис. 3 показаны результаты моделирования динамики двумерного течения невязкого сжимаемого газа, проведенные в рабочих колесах центростремительных турбин, спроектированных на различные расчетные режимы. Как показано на рис. 3, поверхности тока последнего приближения (толстые линии) существенно отличаются от линий предварительного разбиения канала (тонкие линии).

Всего для необходимой сходимости (2 % по скорости) потребовалось выполнить от 12 до 15 приближений. Время, затраченное машиной на одно приближение, составило 0,016 с. В рассматриваемом примере коэффициент релаксации равен α =0,5.

На рис. 3 показано, что с увеличением кривизны линий меридионального контура рабочего колеса линии тока приближенны к кожуху турбины. Преимущественно это выражено в турбине № 1 в зоне прямых l_5 , l_6 и l_7 . Слабее это выражено в турбинах № 2 и 3 в зоне прямых l_6 и l_7 . В области этих прямых на внутреннем контуре меридионального профиля появляются отрицательные скорости. Это обстоятельство дает основание предполагать, что в рабочих колесах турбины образуется отрыв течения (возвратные течения). На рис. 3 область возвратных течений заштрихована. Граница области возвратных течений определена при условии равенства нулю меридиональной проекции скорости. При увеличении расчетного давления газа на входе в турбину линии тока несколько выравниваются. К примеру, в проточной части № 4 линии тока более ровные, чем в проточных частях № 1, 2 и 3.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что возрастание высот лопаток рабочего колеса на входе l_1 и выходе l_2 приводит к возрастанию КПД турбины (рис. 2), падению эффективной мощности турбины, а также в проточной части турбины увеличивается область возвратных течений (рис. 3).

Здесь же хотелось бы отметить, что возможности моделирования отрывных течений в центростремительных турбинах в рамках невязкого газа подробно рассмотрены в работе В.Т. Митрохина [26].



Рис. 3. Результаты расчета течения в полостях центростремительных турбин: а) турбина № 1 – режим № 1; б) турбина № 2 – режим № 2; в) турбина № 3 – режим № 3; г) турбина № 4 – режим № 4

Fig. 3. Results of flow calculation in the cavities of centripetal turbines: a) turbine \mathcal{N} 1 – mode \mathcal{N} 1; b) turbine \mathcal{N} 2 – mode \mathcal{N} 2; c) turbine \mathcal{N} 3 – mode \mathcal{N} 3; d) turbine \mathcal{N} 4 – mode \mathcal{N} 4

Экспериментальная проверка модели

Для экспериментальной проверки математической модели двумерного вихревого течения невязкого сжимаемого газа в проточной части центростремительной турбины проведена продувка турбины турбокомпрессора ТКР-14С-27 на специальном стенде. Стенд позволяет по измеряемым параметрам определять КПД турбины рис. 2, а также производить замер поля скорости на выходе из проточной части турбины. Описание стенда приведено в работах [16, 17]. Для замеров параметров потока за турбиной, в районе выхода газа из рабочего колеса, на стенд установлен шаровой зонд с координатным устройством. Кроме замера полного давления зонд позволяет измерять угол выхода потока из турбины.

Для проверки адекватности был произведен расчет газовой динамики двумерного течения в проточной части штатной турбины TKP-14C-27 на режиме максимума КПД и режиме отрывного течения. Результаты расчета приведены на рис. 4. Экспериментальная проверка на режиме максимума КПД производилась следующим образом. Сравнивалось расчетное поле абсолютной скорости на выходе из рабочего колеса с экспериментально замеренным полем скорости относительно неподвижной системы координат. В решение задачи вносились поправки экспериментальными значениями углов α_2 , замеренными в сечениях l_8 и l_9 (рис. 4).

Для статистической обработки экспериментально замеренного поля скорости использовались возможности программы Mathcad [29, 30]. Для расчета доверительного интервала использовалось распределение Стьюдента.

Сопоставление рассчитанного профиля скорости с экспериментально замеренным показывает хорошее совпадение в средней и привтулочной областях течения (рис. 5).



Рис. 4. Результаты расчета течения в полостях штатной турбины: а) режим отрывного течения; б) режим максимума КПД





Рис. 5. Экспериментальный и расчетный профиль скоростей на выходе из турбины на режиме максимума КПД; 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая после 14 приближений с корректировкой экспериментальными значениями углов α₂

Fig. 5. Experimental and calculated velocity profile at the turbine outlet at the maximum efficiency mode: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve after 14 approximations with correction of experimental angles α_2

Метод расчета двумерного течения не учитывает влияния переднего осевого зазора, особенно в выходном сечении, вызывающего искажение структуры потока на периферии. Поэтому погрешность расчета в этой области несколько больше (9–14 %), чем в остальной части выходного сечения (рис. 5).

В основном расчет течения на режиме максимума КПД можно считать удовлетворительным, поскольку расхождения между вычисленными и экспериментальными значениями c_2 в средней и привтулочной областях не выходят за границы доверительного интервала (рис. 5).

Экспериментальная проверка на режиме отрывного течения. Начало области отрыва течения по радиусу располагается в привтулочной области. Для определения области отрыва за рабочим колесом измерялись и сравнивались между собой давление торможения и статическое давление. Сложность при этом составляло определение угла выхода потока. Вблизи области отрыва течения поворот измерительного устройства в диапазоне от -10° до $+10^{\circ}$ не приводил к перемене давления торможения. Вследствие этого окончательное суждение о появлении области отрыва регистрировалось при равенстве давления торможения и статического давления.

Экспериментально измеренные давления по высоте выходного сечения проточной части приведены на рис. 6. Как показано на рис. 6, в прикорневой области появляется срыв потока. Протяженность зоны срыва течения вдоль выходного сечения рабочего колеса устанавливалась тогда, когда давление торможения было равно статическому давлению.

Сравнение расчетных (рис. 4, *a*) и экспериментальные данных (рис. 6) на режиме отрыва течения позволяет сделать заключение: предположение, о том, что в турбине возникает отрыв потока, нашло экспериментальное подтверждение.

Результаты данного эксперимента можно распространить и на опытные турбины № 1, 2 и 3, в

которых возникает зона возвратных течений, так как эти турбины и штатная турбина относятся к одному типоразмеру.

Выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о следующем:

- Проверка адекватности одномерной модели расчета турбины, выполненная путем сравнения расчетных зависимостей η_r=f(H
 _r), N_r=f(H
 _r) штатной турбины с экспериментальными данными, показала, что погрешность расчета не превышает величины 2 %.
- 2. Во всем интервале изменения напора опытные турбины эффективнее штатной.
- 3. Понижение расчетного давления перед турбиной ведет к возрастанию высот лопатки рабочего колеса на входе l_1 и выходе l_2 , возрастанию КПД турбины, падению эффективной мощности, а также в проточной части турбины возрастает область возвратных течений. На основании этого при проектировании центростремительной турбины рекомендуем принимать значение полного давления газа на входе в турбину $p_0^*=0,24$ МПа. Это позволит избежать области возвратных течений.
- 4. При увеличении расчетного давления газа на входе в турбину линии тока несколько выравниваются. К примеру, в рабочем колесе турбины № 4 линии тока более гладкие, чем в рабочих колесах турбин № 1, 2 и 3.
- 5. Сопоставление рассчитанного профиля скорости с экспериментально замеренным не режиме



Рис. 6. Изменение давления торможения и статического давления по высоте выходного сечения

Fig. 6. Change of braking pressure and static pressure in the height of the output section

максимума КПД показывает хорошее совпадение в центральной и прикорневой областях течения. Метод расчета двумерного течения не учитывает влияния переднего осевого зазора, особенно в выходном сечении, вызывающего искажение структуры потока на периферии. Поэтому погрешность расчета в этой области нес-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Feng Z.P., Deng Q.H., Li J. Aerothermodynamic design and numerical simulation of radial inflow turbine impeller for a 100 kW microturbine // Turbo Expo 2005: Power for land, sea, and air. Nevada, 2005. V. 1. P. 873–880.
- Experimental validation of an integrated optimization design of radial turbine for micro gas turbines / L. Fu, Z.P. Feng, G.J. Li, Q.H. Deng, Y. Shi, T.Y. Gao // Journal of Zhejiang university science. – March 2015. – V. 16. – Iss. 3. – P. 241–249.
- Murugan D.M., Tabakoff W., Hamed A. Three-dimensional flow field measurements using LDV in the exit region of a radial inflow turbine // Experiments in fluids. - May 1996. - V. 21. -Iss. 1. - P. 1-10.
- Байков Б.П. Особенности расчета турбины, работающей на газах переменного давления // Труды Центрального научно-исследовательского дизельного института. – 1955. – Вып. 28. – С. 68–87.
- Иванов П.В. Расчет радиальной импульсной турбины с учетом перетекания и упрощенный расчет // Труды Центрального научно-исследовательского дизельного института. – 1960. – Вып. 39. – С. 66–73.
- Пассар А.В., Лашко В.А. Выбор расчетного режима и оценка эффективности турбины в нестационарном потоке // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2011. – № 2 (167). – С. 17–22.
- Bayomi N.N., Abd EI-Maksoud R.M. Two operating modes for turbocharger system // Energy Conversion and Management. – 2012. – № 58. – P. 59–65.
- Binder N., Garcia B.J., Carbonneau X. Dynamic response in transient operation of a variable geometry turbine stage: influence of the aerodynamic performance // International Journal of Rotating Machinery. - 2013. - Article ID 735321. - P. 1-11.
- Ghasemi S., Shirani E., Hajilouy-Benisi A. Performance prediction of twin-entry turbocharger turbines // Turbo Expo 2002: ASME. – Amsterdam, 2002. – V. 1. – P. 1087–1095.
- Rotor-blades profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness / B.T. Lebele-Alawa, H.I. Hart, S.O.T. Ogaji, S.D. Probert // Applied Energy. - 2008. - № 85. - P. 494-505.
- Kou H.J., Lin J.S., Zhang J.H. Numerical study on vibration stress of rotating fan blade under aerodynamic load at critical speed // Journal of Aerospace Engineering. - 2015. - № 230 (6). -P. 1044-1058.
- Newton P., Martinez-Botas R., Seiler M. A three-dimensional computational study of pulsating flow inside a double entry turbine // Journal of Turbomachinery. - 2014. - V. 137. - P. 1-10.
- Comparison between the steady performance of double-entry and twin-entry turbocharger turbines / A. Romagnoli, C.D. Copeland, R. Martinez-Botas, M. Seiler, S. Rajoo, A. Costall // Journal of Turbomachinery. - 2013. - V. 135. - P. 1-11.
- Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software. – Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2010. – 480 p.

колько больше (9–14 %), чем в остальной части выходного сечения. В основном расчет течения на режиме максимума КПД можно считать удовлетворительным, поскольку расхождения между расчетными и экспериментальными значениями c_2 в средней и привтулочной зонах не выходят за границы доверительного интервала.

- Епифанов А.А. Численное моделирование трехмерного течения в решетках и ступенях малорасходных турбин ЛПИ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 14 с.
- 16. Пассар А.В., Тимошенко Д.В. Исследование влияния степени радиальности на структуру потока в проточной части радиально-осевой турбины газотурбинной установки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 24–38.
- Пассар А.В. Влияние формы меридионального контура рабочего колеса на параметры потока газа в радиально-осевой турбине газотурбинной установки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 33–48.
- Пассар А.В. Влияние ширины рабочего колеса на эффективность радиально-осевой турбины // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 4 (53). С. 61–73.
- Зенков А.В. Численные методы. М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 124 с.
- 20. Wu Chung-Hua. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed-flow types // Transaction of the American Society of Mechanical Engineers. 1952. V. 74. № 8. P. 1363-1380.
- Hawthorne W., Novak R. The aerodynamics of turbo-machinery // Annual review of fluid mechanics. – 1969. – V. 1. – № 4. – P. 341–366.
- Pulliam T.H., Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of three-dimensional compressible flow // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. – 1980. – V. 18. – № 2. – P. 159–167.
- Chakravarthy S.R. Euler equation implicit schemes and boundary conditions // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 1983. V. 21. № 5. P. 699–706.
- Зализняк В.Е. Численные методы. Основы научных вычислений. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 356 с.
- Численные методы / У.Г. Пирумов, В.Ю. Гидаспов, И.Э. Иванов, Д.Л. Ревизников, В.Ю. Стрельцов, В.Ф. Формалев. М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 422 с.
- Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах. – М.: Машиностроение, 1974. – 228 с.
- 27. Лашко В.А., Пассар А.В. Расчет коэффициента потерь кинетической энергии в проточной части как одна из проблем реализации комплексного подхода // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 1 (20). С. 79–90.
- Ревинская О.Г. Основы программирования в МАТLAB. СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2016. – 208 с.
- Воскобойников Ю.Е., Задорожный А.Ф. Основы вычислений и программирования в пакете Mathcad PRIME. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. –224 с.
- Далингер В.А., Симонженков С.Д., Галюкшов Б.С. Теория вероятностей и математическая статистика с применением Mathcad. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 422 с.

Поступила 28.02.2019 г.

Информация об авторах

Пассар А.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Численные методы математической физики» Вычислительного центра ДВО РАН.

UDC 621.43

INFLUENCE OF BLADE HEIGHT IN CENTRIPETAL TURBINE IMPELLER ON FLOW GAS DYNAMICS

Andrey V. Passar,

passar av@mail.ru

Computer center of Far East branch of the Russian Academy of Science, 65, Kim U Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to create effective gas turbine engines used in the oil and gas industry. **The aim** of the research is to investigate the impact of the turbine design mode on flow gas dynamics in its impeller using the model of spatial gas flow in a centripetal turbine.

Object: centripetal turbine of low power energy unit applied in the oil and gas industry.

Methods. Spatial flow equations are used to describe the flow in the turbine. To bring this system of equations to the system of equations in two coordinates, the method of lines is used. The obtained system of two-dimensional flow equations is solved by the method of successive approximations.

Result. Based on the optimal design method, the impellers of the centripetal turbine are designed for different design pressures of gas at the inlet. The design results showed that, with the increase of the calculated gas pressure at the turbine inlet, the area of the passage section at the inlet and outlet of the impeller decreases. On the basis of one-dimensional model of the flow in turbines the influence of the height of impeller blades on the turbine efficiency and power is shown. As a result of the research, it can be stated that with the increase in the height of the impeller blade, the efficiency of the turbine grows, and the effective power decreases. The effect of the calculated gas pressure at the turbine inlet on the gas dynamics of the flow in its impeller is shown for a centripetal turbine. As a result of the studies it was found that with a decrease in the calculated gas pressure at the turbine of the flow separation region is determined under the condition of zero Meridian projection of the relative velocity. The experimental and calculated velocity profile at the turbine outlet is presented. Comparison of the calculated velocity profile with the experimental one allows us to conclude that the applied model for calculating the two-dimensional flow in the turbine make it possible to calculate the gas dynamics of the flow in it with high accuracy.

Key word:

Flow section area, centripetal turbine, turbine efficiency, microturbine, velocity field, current line, blade height, power plant.

REFERENCES

- Feng Z.P., Deng Q.H., Li J. Aerothermodynamic design and numerical simulation of radial inflow turbine impeller for a 100 kW microturbine. *Turbo Expo 2005: Power for land, sea, and air.* Nevada, 2005. Vol. 1, pp. 873–880.
- Fu L., Feng Z.P., Li G.J., Deng Q.H., Shi Y., Gao T.Y. Experimental validation of an integrated optimization design of radial turbine for micro gas turbines. *Journal of Zhejiang university science*, March 2015, vol. 16, Iss. 3, pp. 241–249.
- Murugan D.M., Tabakoff W., Hamed A. Three-dimensional flow field measurements using LDV in the exit region of a radial inflow turbine. *Experiments in fluids*, May 1996, vol. 21, Iss. 1, pp. 1–10.
- Baykov B.P. Osobennosti rascheta turbiny, rabotayushchey na gazakh peremennogo davleniya [Features of calculation of the turbine operating on gases of variable pressure]. *Proceedings of* the Central research diesel Institute, 1955, vol. 28, pp. 68-87.
- Ivanov P.V. Raschet radialnoy impulsnoy turbiny s uchetom peretekaniya i uproshchenny raschet [Calculation of radial impulse turbine taking into account overflow and simplified calculation]. *Proceedings of the Central research diesel Institute*, 1960, vol. 39, pp. 66–73.
- Passar A.V., Lashko V.A. Selection of the design mode and evaluation of the turbine efficiency in a non-stationary flow. *Directory. Engineering journal with Appendix*, 2011, no. 2 (167), pp. 17–22. In Rus.
- Bayomi N.N., Abd EI-Maksoud R.M. Two operating modes for turbocharger system. *Energy Conversion and Management*, 2012, no. 58, pp. 59-65.
- Binder N., Garcia B.J., Carbonneau X. Dynamic response in transient operation of a variable geometry turbine stage: Influence of the aerodynamic performance. *International Journal of Rotating Machinery*, 2013. Article ID 735321, pp. 1–11.
- Ghasemi S., Shirani E., Hajilouy-Benisi A. Performance prediction of twin-entry turbocharger turbines. *Turbo Expo 2002: Ame-*

rican Society of Mechanical Engineers. Amsterdam, 2002. Vol. 1, pp. 1087–1095.

- Lebele-Alawa B.T., Hart H.I., Ogaji S.O.T., Probert S.D. Rotorblades profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness. *Applied Energy*, 2008, no. 85, pp. 494–505.
- Kou H.J., Lin J.S., Zhang J.H. Numerical study on vibration stress of rotating fan blade under aerodynamic load at critical speed. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, no. 230 (6), pp. 1044–1058.
- Newton P., Martinez-Botas R., Seiler M. A three-dimensional computational study of pulsating flow inside a double entry turbine. *Journal of Turbomachinery*, 2014, vol. 137, pp. 1–10.
- Romagnoli A., Copeland C.D., Martinez-Botas R., Seiler M., Rajoo S., Costall A. Comparison between the steady performance of double-entry and twin-entry turbocharger turbines. *Journal of Turbomachinery*, 2013, vol. 135, pp. 1–11.
- Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software. Amsterdam, Elsevier, Academic Press, 2010. 480 p.
- 15. Epifanov A.A. Chislennoe modelirovanie trekhmernogo techeniya v reshetkakh i stupenyakh maloraskhodnykh turbin LPI. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Numerical simulation of three-dimensional flow in lattices and stages of low-flow turbines of LPI. Cand. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 2012. 14 p.
- 16. Passar A.V., Timoshenko D.V. Study of the influence of the degree of radiality on the flow structure in the flow part of the radial-axial turbine of a gas turbine installation. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 24-38. In Rus.
- 17. Passar A.V. The influence of the shape of the meridional contour of the impeller on the parameters of gas flow in radial-axial turbine gas turbine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 33–48. In Rus.
- Passar A.V. The effect of the width of the impeller on the efficiency of the radial-axial turbine. *Mechanical industry and engineering education*, 2017, no. 4 (53), pp. 61–73. In Rus.

- Wu Chung-Hua. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed-flow types. *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 1952, vol. 74, no. 8, pp. 1363–1380.
- Hawthorne W., Novak R. The aerodynamics of turbo-machinery. *Annual review of fluid mechanics*, 1969, vol. 1, no. 4, pp. 341-366.
- Zenkov A.V. Chislennye metody [Numerical method]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 124 p.
- Pulliam T.H., Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of three-dimensional compressible flow. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1980, vol. 18, no. 2, pp. 159–167.
- Chakravarthy S.R. Euler equation implicit schemes and boundary conditions. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1983, vol. 21, no. 5, pp. 699-706.
- Zaliznyak V.E. Chislennye metody. Osnovy nauchnykh vychisleniy [Numerical methods. Fundamentals of scientific computing]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 356 p.
- Pirumov U.G., Gidaspov V.Yu., Ivanov I.E., Reviznikov D.L., Streltsov V.Yu., Formalev V.F. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 422 p.

- Chumakov Yu.A. *Teoriya i raschet transportnykh gazoturbinnykh dvigateley* [Theory and calculation of transport gas turbine engines]. Moscow, INFRA-M; Forum Publ., 2012. 448 p.
- Lashko V.A., Passar A.V. Calculation of kinetic energy losses coefficient in the flow range as one of the challenges of implementing an integrated approach. *Bulletin of the Pacific national Uni*versity, 2011, no. 1 (20), pp. 79–90. In Rus.
- Revinskaya O.G. Osnovy programmirovaniya v MATLAB [The basics of programming in MATLAB]. St-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2016. 208 p.
- Voskoboynikov Yu.E., Zadorozhnyy A.F. Osnovy vychisleniy i programmirovaniya v pakete Mathcad PRIME [Fundamentals of computing and programming in Mathcad PRIME]. St-Petersburg, Lan Publ., 2016. 224 p.
- Dalinger V.A., Simonzhenkov S.D., Galyukshov B.S. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika s primeneniem Mathcad [Probability theory and mathematical statistics using Mathcad]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 422 p.

Received: 28 February 2019.

Information about the authors

Andrey V. Passar, Cand. Sc., senior researcher, Computer center of Far East branch of the Russian Academy of Science.

УДК 621.01/.03

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГАЗОПРОВОДА ПО УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Сызранцев Владимир Николаевич¹,

v syzrantsev@mail.ru

Сызранцева Ксения Владимировна¹,

kv.syzr@gmail.com

¹ Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность. В реальных эксплуатационных условиях газопроводы работают при переменном уровне давления, которое в общем случае является величиной случайной, с неизвестным законом распределения. Также случайной является и температура окружающей среды. Вследствие отмеченных условий напряжения, возникающие в стенках трубы, не могут быть описаны законами, исследованными в рамках теории параметрической статистики. Основой прогнозирования ресурса газопровода является кривая усталости материала трубы, связывающая амплитуду действующих напряжений не со временем работы испытываемых до разрушения образцов, а с числом циклов их деформирования. Для определения в процессе эксплуатации газопровода остаточного ресурса во времени необходимо оценивать накопление в его материале усталостных повреждений при любом законе распределения напряжений независимо от его сложности. В настоящее время методики прогнозирования остаточного ресурса газопроводов, учитывающие фактический спектр изменения внешних нагрузок и процессы накопления от них усталостных повреждений в стенке трубы, отсутствуют. Поскольку газопроводы являются потенциально опасными объектами, определение их остаточного ресурса по времени эксплуатации является задачей важнейшей.

Цель: определение во временном диапазоне остаточного ресурса газопровода с заданной вероятностью неразрушения, подвергающегося в процессе эксплуатации воздействию случайного спектра внешних нагрузок независимо от сложности спектра, с учетом процессов накопления усталостных повреждений в газопроводе.

Методы: кинетическая теория механической усталости, методы непараметрической статистики, измерение циклических деформаций с помощью датчиков деформаций переменной чувствительности.

Результаты. Разработана расчетно-экспериментальная методика, основанная на комплексном использовании: кинетической теории механической усталости, учитывающей накопление повреждений в процессе циклического деформирования изделий; методов непараметрической статистики, обеспечивающих восстановление функции плотности распределения напряжений независимо от сложности закона их изменения в процессе эксплуатации газопровода; оригинальных средств измерения циклических деформаций – датчиков деформаций переменной чувствительности. Рассмотрены основные этапы реализации методики. По зафиксированной в процессе эксплуатации газопровода на датчике величине перемещения границы его реакции (первых «темных пятен») на основе разработанных в рамках кинетической теории усталости уравнений получены математические зависимости решения задачи определения эквивалентных по повреждающему воздействию чисел циклов нагружения для восстановления длительности ступеней блока напряжений, расчета эквивалентных по повреждающему воздействию чисел циклов напряжении. На примере реализации методики установлена зависимость остаточный ресурса газопровода в зависимости от величины реакции примени. По повреждающему воздействию чисел циклов нагружения для восстановием зависимость остаточный ресурс различных участков газопровода в условиях эксплуатации. По повреждающему воздействию чисел циклов нагружения для восстановлена зависимость остаточного ресурса газопровода в зависимости от величины реакции примере реализации методики устаточный ресурс различных участков газопровода в условиях эксплуатации. Показан вариант использования результатов реализации методики для определения влияния коррозионного дефекта газопровода на его остаточный ресурс.

Ключевые слова:

Газопровод, датчики деформаций переменной чувствительности, теория механической усталости, эквивалентные числа циклов, эквивалентные напряжения, остаточный ресурс.

Характеристика проблемы прогнозирования остаточного ресурса газопроводов в эксплуатации

В реальных эксплуатационных условиях газопроводы работают при переменном уровне давления, которое в общем случае является величиной случайной с неизвестным законом распределения. Также случайной является и температура окружающей среды. Вследствие отмеченных условий напряжения, возникающие в стенках трубы, не могут быть описаны законами, исследованными в рамках теории параметрической статистики [1]. Помимо этого, и предельные напряжения, используемые при реализации методик определения прочности газопровода, также являются величинами случайными. Поскольку газопроводы являются потенциально опасными объектами, определение их надежности в процессе эксплуатации является задачей важнейшей. Основными показателями, используемыми в настоящее время для определения надежности газопроводов [2], являются: безотказность, оцениваемая по вероятности безотказной работы, и долговечность – ресурс.

Традиционные методики расчета вероятности безотказной работы различных изделий [3, 4], в том числе и газопроводов [2, 5], как правило, базируются на описании случайных величин действующих и предельных напряжений нормальным законом распределения. Для учета фактических законов распределения. Для учета фактических законов распределения напряжений в работе [1] предложены и реализованы методики расчета вероятности безотказной работы газопроводов, в которых неизвестные законы распределения действующих и предельных напряжений восстанавливаются на основе их выборок с использованием математиче ского аппарата непараметрической статистики [6-10]. Данный подход распространен и на другую оценку безотказности газопровода – определение, независимо от сложности законов распределения действующих и предельных напряжений, квантилей коэффициента запаса прочности [1]. В данном подходе процессы накопления усталостных повреждений в материале трубы при эксплуатации газопровода не учитываются, что не позволяет научно обосновать значения вероятности безотказной работы, принимаемых в качестве предельных, соответствующих отказу газопровода.

Для организации планово-предупредительных профилактических и ремонтных работ газопровода более информативен другой показатель его надежности: долговечность, в вероятностной постановке – гамма (γ) процентный ресурс по усталостной прочности [2, 4, 5]. Несмотря на почти двухсотлетние исследования, единственными достоверными данными об усталостной прочности материала являются те, которые получены в процессе циклического деформирования испытываемых образцов до их разрушения при нескольких уровнях действующих напряжений [4, 11-14]. Результаты испытаний образцов на долговечность представляются в виде кривой усталости (кривой Велера) [15–17], которая связывает напряжения (σ_a) и числа циклов (N) до разрушения образцов.

Выделим основные проблемы решения задачи прогнозирования γ -процентного ресурса газопровода на основе кривой усталости.

Анализ экспериментальных данных σ_{ak} , $\lg N_k$, k=1, M свидетельствует о близкой к прямолинейной их связи, в результате для описания кривой усталости традиционно используется линейная регрессионная зависимость, соответствующая *γ*=50 % вероятности разрушения образцов. Для прогнозирования у-процентного ресурса необходима соответствующая допустимой вероятности разрушения образцов $(1-\gamma)$ левая граница доверительного интервала, рассчитываемая на основе статистической обработки данных. Применение здесь метода линейного регрессионного анализа корректно лишь для распределений случайных величин σ_a и lgN по нормальному закону [3, 4]. Как показано в работе [18], вследствие логарифмирования оценки линейной модели кривой усталости смещаются, левые границы ее доверительных интервалов, рассчитанные с учетом восстановленных методами непараметрической статистики [1] фактических законов распределения N, приводят к ошибкам прогнозирования чисел циклов до поломки в десятки и более процентов.

Левая граница доверительного интервала кривой усталости при σ_a =const позволяет рассчитать число циклов деформирования N, соответствующее вероятности неразрушения γ . В процессе эксплуатации напряжения в газопроводе изменяются по законам случайных величин при этом прогнозирование γ -процентного ресурса предполагает его оценку не в числе циклов, а во временном диапазоне. Из сказанного следует, что описанная выше модель обработки данных усталостных испытаний позволяет рассчитывать у-процентный ресурс газопровода когда известны напряжения, эквивалентные случайному закону их изменения в газопроводе, и числа циклов, эквивалентные случайному процессу деформирования газопровода в эксплуатации. Поскольку при работе газопровода деградация его прочности связана с накоплением в материале усталостных повреждений, как эквивалентные напряжения, так и эквивалентные числа циклов нагружения необходимо определять исходя из их повреждающего воздействия. Решение этих задач в рамках линейных регрессионных моделей, описывающих кривые усталости, предполагающих за каждый цикл деформирования внесение величины поврежденности, равной 1/N, не представляется возможным.

Цель работы – определение во временном диапазоне остаточного ресурса газопровода с заданной вероятностью неразрушения, подвергающегося в процессе эксплуатации воздействию случайного спектра внешних нагрузок независимо от сложности спектра, с учетом процессов накопления усталостных повреждений в газопроводе, для достижения которой разработана расчетно-экспериментальная методика. Методика основана на результатах, полученных в трех различных направлениях научных исследований.

Первое направление связано с развитием кинетической теории механической усталости [17–19], в рамках которой для описания кривой малоцикловой усталости получено следующее уравнение:

$$N(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \overline{\sigma_b}}{\vartheta}}\right) Q_T B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_a)], \quad (1)$$

где

$$B_{0} = \frac{\ln\left\{1 + \left[\exp\left(\frac{\overline{\sigma_{b}} - \sigma_{R}}{\sigma_{R}}\right) - 1\right]^{-1}\right\}}{\overline{\sigma_{b}}};$$
$$C_{0} = -\frac{\overline{\sigma_{b}}}{(\sigma_{R} - \sigma_{RT})(\overline{\sigma_{b}} - \sigma_{R})}; A_{0} = \frac{D}{1 - D},$$

D степень усталостного повреждения _ $0 \le D_0 \le D \le D_k \le 1$; D_0 – исходная поврежденность материала; D_k – величина повреждения, соответствующая моменту действия последнего (разрушающего) цикла с напряжением σ_a ; ϑ – параметр, характеризующий наклон кривой усталости в системе координат lgN- σ_a ; Q_T - коэффициент, учитывающий сопротивление материала детали росту усталостных трещин; $\bar{\sigma}_{b}$ – математическое ожидание предела прочности материала; σ_{R} – величина предела выносливости материала детали для условий ее циклического деформирования при коэффициенте асимметрии цикла R; $\sigma_{\rm BT}$ – предел текучести при циклическом деформировании.

В работе [18] на примере конкретных данных усталостных испытаний образцов σ_{ak} , N_k , $k=\overline{1,M}$

рассмотрены алгоритмы определения параметров модели (1), построение кривых усталости с различной величиной накопленных повреждений, расчета границ доверительных интервалов.

Второе направление исследований связано со статистической обработкой случайных величин, не описываемых законами, предложенными и исследованными в теории вероятности и математической статистике. Для определения любой сложности априори неизвестной функции плотности распределения (ФПР) случайной величины используется аппарат непараметрической статистики [1, 20–24], следуя которому ФПР $f_n(y)$ на основе выборки случайной величины x_i , i=1,n описывается с помощью оценки Парзена–Розенблатта [9, 10]:

$$f_n(y) = \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^n K[(y - x_i) / h_n],$$
 (2)

где *K*[(*y*-*x_i)/<i>h_n*] – ядерная функция; *h_n* – параметр размытости (ширина окна Парзена–Розенблатта).

Оптимальная величина h_n^* определяется в результате поиска максимума функционала [1, 8]:

$$\max J(h_n^{*}) = \\ = \max_{h_n} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left[\frac{1}{(n-1)h_n} \sum_{j \neq i}^{n-1} K\left(\frac{x_i - x_j}{h_n}\right) \right] \right\}.$$
(3)

В рамках третьего направления разработаны оригинальные средства экспериментальной оценки напряжений при циклическом деформировании деталей – датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ) [25]. Датчики требуемой конфигурации вырезают из электроосажденной фольги, подвергнутой специальной термомеханической обработке [25-28]. Датчики с помощью клея закрепляют в исследуемом месте детали. В процессе циклического деформирования шероховатость поверхности датчика изменяется. При прямом освещении поверхности изменение шероховатости – реакция датчика, воспринимается как «темные пятна». Момент возникновения первых «темных пятен» зависит от числа циклов деформирования и амплитуды циклического напряжения [25, 29]. В результате развития данного направления созданы датчики деформаций переменной чувствительности (ДДПЧ) [30, 31], изготавливаемые на основе ДДИТ, подвергнутых предварительной циклической наработке на образцах специальной формы в условиях известного их напряженно-деформированного состояния. После наработки ДДИТ до появления на их поверхности реакции в виде «темных пятен» датчики с образца снимают, они представляют собой ДДПЧ. Граница первых «темных пятен» на ДДПЧ отделяет на его поверхности рабочую зону, в пределах которой, несмотря на отсутствие на поверхности датчика реакции, его материал накапливает усталостные повреждения в соответствии с заданным на этапе наработки напряженно-деформированным состоянием образца. Вдоль рабочей части ДДПЧ величина накопленных повреждений является переменной, она задается геометрической формой образца, на котором выполняется наработка датчика.

Преимуществами ДДПЧ являются [31]:

- отсутствие инкубационного периода до появления на датчике реакции;
- существенное упрощение процедуры регистрации реакции датчика, заключающееся в измерении по длине его рабочей части величины линейного перемещения (*x_s*) границы первых «темных пятен»;
- возможность фиксации реакции на датчике в любой момент времени испытаний детали или узла.

Технология изготовления ДДПЧ, процедуры их тарирования, математическое описание тарировочных зависимостей, алгоритмы решения задач определения по реакции ДДПЧ напряжений, накопленных усталостных повреждений, эквивалентных напряжений при известных параметрах блока изменения напряжений подробно рассмотрены в работе [31].

Основные этапы расчетно-экспериментальной методики прогнозирования *у*-процентного остаточного ресурса газопровода

Условия, при которых реализуется методика.

 Для материала трубы имеется кривая усталости (рис. 1), параметры и границы доверительных интервалов которой рассчитаны на основе кинетической теории механической усталости [18] путем обработки данных σ_{ak}, N_k, k=1,M испытаний образцов до поломки, изготовленных из американской трубы HS-80.



Рис. 1. Кривая усталости материала трубы (красная) с границами 90% (оранжевая), 95% (зеленая) и 99% (синяя) доверительных интервалов

Fig. 1. Fatigue curve (red) of pipe material with confidence limits 90% (orange), 95% (green) and 99% (blue)

Изложенная в работе [18] процедура обработки экспериментальных данных испытаний образцов на долговечность позволила для данных σ_{ak} , N_k , k=1,M, отраженных на рис. 1, получить следующие значения параметров, входящих в модель (1):

 $D=D_0=6,006\cdot 10^{-11}; Q_T=1,53\cdot 10^6; \overline{\sigma}_b=602,1$ MIIa; $\Im=-121,811; \sigma_{RT}=201,914$ MIIa; $\sigma_R=263,621$ MIIa.

- Изготовлены ДДПЧ [30, 31], в пределах рабочей части которых определена зависимость (рис. 2) величины накопленных повреждений D_x(x_g) [31] – тарировочная зависимость ДДПЧ.
- 3. В течение всего времени эксплуатации газопровод подвергается воздействию внешних нагрузок, процесс изменения которых является случайным и аддитивным.
- 4. Задано время (*T_n*) работы газопровода до наклейки на него ДДПЧ. После чего, в течение времени (*T_g*), газопровод эксплуатировался вместе с ДДПЧ. По истечении времени *T_g* путем измерения величины смещения границы первых «темных пятен» *x_g* зафиксирована реакция датчика на полученные усталостные повреждения.

Реализация методики позволяет во временном диапазоне осуществлять прогноз с заданной вероятностью не разрушения (γ) остаточного ресурса (T_{o}^{γ} , лет) газопровода по критерию усталостной прочности. Методология решения задачи представлена на рис. 3 и состоит из ряда последовательных этапов.

Этап 1 заключается в сборе информации о нагрузках, действующих на газопровод в течение отрезка времени из $T_{\rm H}$, или периода T_g (рис. 3), путем фиксирования (например, ежедневно, в течение года) значений давления P_i , i=1,n=365 (рис. 4) и температуры T_i , i=1,n=365 (рис. 5). Перед реализацией этого этапа на исследуемый участок газопровода помещают (наклеивают) ДДПЧ и после времени T_g эксплуатации газопровода, измеряя смещение x_g границы первых «темных пятен» по длине рабочей части ДДПЧ, фиксируют его реакцию на полученные усталостные повреждения.



Рис. 4. Значения давлений Р_і (МПа) в газопроводе



Рис. 3. Этапы реализации расчетно-экспериментальной методики

Fig. 3. Stages of implementation of computational and experimental method

Воспользовавшись известными выражениями [1, 2]:

$$\sigma_{i} = \psi(h,l) \sqrt{\sigma_{\kappa \mathfrak{n},i}^{2} - \sigma_{\mathfrak{n}\mathfrak{p}i}\sigma_{\kappa \mathfrak{n},i} + \sigma_{\mathfrak{n}\mathfrak{p}i}^{2}},$$

$$\sigma_{\kappa \mathfrak{n},i} = \frac{P_{i}D_{\mathfrak{B}\mathfrak{n}}}{2\delta};$$

$$\sigma_{\mathfrak{n}\mathfrak{p},i} = -\alpha ET_{i} + \mu\sigma_{\kappa \mathfrak{n},i},$$
(4)

где α =1,2·10⁻⁵; μ =0,3; E=2,15·10⁵ МПа – коэффициенты Пуассона и линейного расширения материала, модуль его упругости; δ =20 мм; $D_{\rm BH}$ =1380 мм – толщина стенки и внутренний диаметр трубы; $\psi(h,l) \ge 1$ – коэффициент [1], отражающий увеличение напряжений вследствие наличия коррозионного дефекта глубиной h и длиной l. Рассчитаем выборку возникающих в стенке трубы напряжений (σ_i , $i=\overline{1,n=365}$), гистограмма которых отражена на (рис. 6).

По выборке (σ_i , $i=\overline{1,n}$) методами непараметрической статистики [1], принимая в качестве ядерной функции нормальное ядро [1, 8], решая задачу (2), (3), восстановим необходимую для дальнейших расчетов ФПР напряжений $f_n(\sigma)$:

$$f_n(\sigma) = \frac{1}{nh_{\sigma}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-0.5\left(\frac{\sigma - \sigma_i}{h_{\sigma}}\right)^2\right].$$
 (5)



Рис. 6. Гистограмма действующих напряжений в газопроводе и восстановленная функция $f_n(\sigma)$

Fig. 6. Histogram of stresses occurring in pipe and restored function $f_n(\sigma)$

Начальное значение параметра размытости h_{σ} =2,879 для задачи (3) рассчитывается по зависимости [1]:

$$h_{\sigma} = D_{\sigma} n^{-0.2}$$
, где $D_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n} \left(\sigma_{i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \sigma_{i}\right)^{2}}$. (6)

Оптимальная величина h_{σ} (6), соответствующая максимуму функционала (3), равна $h_{\sigma}=2,368$, функция $f_n(\sigma)$, восстановленная методами непараметрической статистики, показана на рис. 6 линией.

На основе функции *f_n*(*σ*) режим нагружения можно представить в виде ступенчатой циклограм-

мы, содержащей конечное <u>число</u> (*m*) ступеней – блоков напряжений (σ_i , $j=\overline{1,m}$). Сумма относительных продолжительностей ступеней (t_i , $j=\overline{1,m}$), как и интеграл от функции $f_n(\sigma)$, равна единице. Для построения ступенчатой циклограммы нагружения диапазон изменения напряжений ($\sigma_{\min}=\min(\sigma_i)$), $\sigma_{\max}=\max(\sigma_i)$ разбивается на *m* интервалов (в рассматриваемом примере *m*=10), ширина которых:

$$h_m = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / m.$$

В каждом *j*-м интервале рассчитывается его середина

$$\sigma_j = \sigma_{\min} + h_m \, \frac{j}{2} + h_m \, (j-1)$$

и на основе зависимости $\Phi \Pi P$ (5) для полученных значений σ_i , $j=\overline{1,m}$ вычисляются величины:

$$f_{\sigma j} = f_n(\sigma_j). \tag{7}$$

Описанная процедура позволяет для каждой *j*-й ступени блока напряжений σ_j , $j=\overline{1,m}$ рассчитать значение относительной продолжительности *j*-й ступени по формуле:

$$t_{j} = f_{\sigma j} \frac{\sigma_{j}}{\sum_{i=1}^{m} f_{\sigma j} \sigma_{j}}.$$
(8)

Располагая ступени блока σ_i , t_j , $j=\overline{1,m}$, вычисленные в соответствии с формулами (7) и (8), в порядке снижения уровня напряжений, получаем необходимую для решения задачи гистограмму изменения напряжений в газопроводе. Для рассматриваемого закона (рис. 6) блок изменения напряжений показан на рис. 7.



Рис. 7. Блок изменения напряжений для $\Phi \Pi P f_n(\sigma)$ рис. 6

Fig. 7. Block of stress change for distribution density function $f_n(\sigma)$ showed in Fig. 6

Этап 2. При зафиксированной после работы трубопровода с ДДПЧ величине x_g совместно с установленным блоком изменения напряжений (рис. 7) определяется эквивалентное по повреждающему воздействию число циклов $N_{\Sigma g}$ деформирования газопровода за время его эксплуатации с ДДПЧ.

Методика решения этой задачи основана на использовании уравнения (1) в соответствии с алгоритмом, рассмотренным в работе [31].

Воспользуемся тарировочной зависимостью для ДДПЧ (рис. 2), отражающей изменение поврежденности $D_x(x_g)$ датчика в пределах его рабочей части. Наработка ДДПЧ выполняется на образце с конической рабочей частью (угол конуса α) в условиях изгиба с вращением образца при величине изгибающего момента (M) в течение N_g числа циклов деформирования до появления на датчике реакции в виде первых «темных пятен» в сечении образца диаметром d_g . Действующее в этом сечении напряжение (σ_{gx}), соответствующее значению параметра $x_g=0$, известно:

$$\sigma_{gx} = \frac{32M}{\left[\pi (2 \operatorname{tg} \alpha x_g + d_g)\right]^3}.$$
 (9)

Поврежденность ДДПЧ $D_{g0}=D_x(x_g=0)$ на границе первых «темных пятен» на основе уравнения (1) рассчитывается с учетом (9) при $x_g=0$ по выражению:

$$D_{g0} = D_0 + \frac{E_g}{E_g + C_0},$$
 (10)

где

$$E_{g} = (\sigma_{gx})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{gn}}{P_{0}Q_{T}B_{0}} \right] \right\},$$
$$P_{0} = 1 - 10^{(\sigma_{gx} - \overline{\sigma_{b}})/9},$$
$$N_{gn} = P_{0}Q_{T}B_{0} \ln[1 - \exp(A_{0}\sigma_{gx})] - N_{g},$$
$$A_{0} = C_{0} \frac{D_{0}}{1 - D_{0}}.$$

Расчет поврежденности датчика $D_x(x_g)$ в сечении, задаваемом координатой x_g =const, выполняется по зависимости (10) при значении σ_{gx} , вычисленном по формуле (9).

Если в процессе эксплуатации газопровода с ДДПЧ его реакция – граница первых «темных пятен», сместилась на величину x_g =const, то датчик получил дополнительное повреждение, равное:

$$D_{gt} = D_{g0} - D_x(x_g).$$
(11)

Это же повреждение получил материал трубы газопровода за пока неизвестное суммарное число циклов деформирования $N_{\Sigma g}$ в условиях изменения напряжений в соответствии с установленным выше (рис. 6) блоком нагружения.

Фиксируя величину $N_{\Sigma g}$ =const, определим длительности ступеней блока нагружения:

$$N_{j} = N_{\Sigma g} t_{j}, \quad j = 1, m.$$
 (12)

Значения N_j , полученные по <u>фор</u>муле (12), с учетом известных величин σ_j , j=1,m, позволяют рассчитать повреждения материала трубы $D_j(N_{\Sigma g})$, j=1,m после реализации каждой *j*-й ступени блока нагружения и определить суммарную величину повреждения:

$$D_{\Sigma}(N_{\Sigma_g}) = \sum_{j=1}^{m} D_j(N_{\Sigma_g}).$$
 (13)

Расчет $D_j(N_{\Sigma g})$, $j=\overline{1,m}$ включает первоначальное обнуление значений $D_j(N_{\Sigma g})=0$ и дальнейшие последовательные вычисления для каждого $j=\overline{1,m}$ по формулам, полученным на основе уравнения (1):

$$A_{j}(N_{\Sigma_{g}}) = \frac{D_{0} + \sum_{k=1}^{j} D_{k}(N_{\Sigma_{g}})}{1 - \left(D_{0} + \sum_{k=1}^{j} D_{k}(N_{\Sigma_{g}})\right)},$$

$$P_{j} = 1 - 10^{(\sigma_{j} - \overline{\sigma_{b}})/9},$$
(14)

$$N_{nj}(N_{\Sigma g}) = P_j Q_T B_0 \ln\{1 - \exp[A_j(N_{\Sigma g}) - O_0 \sigma_j]\};$$

$$E_j(N_{\Sigma g}) = \sigma_j^{-1} \ln\left\{1 - \exp\left[\frac{N_{nj}(N_{\Sigma g}) - N_j}{P_j Q_T B_0}\right]\right\};$$

$$D_j(N_{\Sigma g}) = \frac{E_j(N_{\Sigma g})}{E_j(N_{\Sigma g}) + C_0} - \left[D_0 + \sum_{k=1}^j D_k(N_{\Sigma k})\right].$$

Поскольку рассчитанная по формуле (13) с учетом (14) на основе кинетической теории усталости величина $D_{\Sigma}(N_{\Sigma g})$ должна быть равна зафиксированному с помощью ДДПЧ значению D_{gi} , имеем следующее, трансцендентное относительно $N_{\Sigma g}$, уравнение:

$$D_{\Sigma}(N_{\Sigma_{p}}) - D_{pt} = 0.$$
 (15)

Установленное в результате решения уравнения (11) число циклов $N_{\Sigma g}$ полностью восстанавливает параметры $\sigma_j, N_j = N_{\Sigma g} \cdot t_j, j = \overline{1,m}$ всех *m* ступеней блока изменения напряжений.

Этап 3. Определение напряжения σ_E , эквивалентного по повреждающему воздействию блоку напряжений σ_i , N_i , j=1,m, восстановленному в результате реализации второго этапа методики. Для решения задачи воспользуемся работой [31].

За все *m* ступеней блока материал трубопровода получит повреждение (13) $D_{\Sigma}(N_{\Sigma_g})$, с учетом которого выражение для кривой усталости (1) запишем в виде:

$$N_D(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \overline{\sigma_b}}{9}}\right) Q_T B_0 \ln[1 - \exp(A_\Sigma C_0 \sigma_a)], (16)$$

где

$$A_{\Sigma} = \frac{D_{\Sigma}(N_{\Sigma g}) + D_{0}}{1 - D_{\Sigma}(N_{\Sigma g}) - D_{0}}$$

Для определения числа циклов до разрушения газопровода, деформирование которого происходит при амплитуде напряжений $\sigma_a = \sigma_E$, воспользуемся выражением (1) при $D=D_0$:

$$N(\sigma_E) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_E - \overline{\sigma_b}}{9}}\right) Q_T B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_E)],$$
$$A_0 = D_0 / (1 - D_0). \tag{17}$$

Число циклов $N(\sigma_E)$ (17) по отношению к числу циклов, рассчитанному по зависимости (16) при $\sigma_a = \sigma_E$, отличается на величину $N_{\Sigma g}$. В результате имеем следующее уравнение:

$$N_D(\sigma_E) + N_{\Sigma_P} - N(\sigma_E) = 0.$$
(18)

Уравнение (18) относительно σ_E является трансцендентным, его решение выполняется численным методом.

Этап 4. Определенные в результате реализации третьего этапа рассматриваемой методики эквивалентное напряжение σ_E и эквивалентное по повреждающему воздействию число циклов нагружения $N_{\Sigma g}$ газопровода за период его эксплуатации в течение времени T_g являются исходными данными для прогнозирования остаточного ресурса газопровода на основе известной кривой усталости материала трубы (рис. 1). Решение задачи выполняется в следующей последовательности.

Рассчитывают коэффициент $K_{E}=N_{\Sigma g}/T_{g}$, имеющий размерность цикл/год при работе газопровода с ДДПЧ в течение года, который позволяет привести случайный режим эксплуатации газопровода к эквивалентному ему блочному режиму с установленными параметрами. Подставляя полученную величину σ_{E} в описывающее кривую усталости математическое выражение (1) при $D=D_0$, рассчитывают медианное значение $N_{\scriptscriptstyle m}$ числа циклов до отказа трубы вследствие усталости, а используя левую границу доверительного интервала кривой усталости, соответствующую вероятности разрушения $1-\gamma$, определяют число циклов N_m^{γ} с вероятностью неразрушения у. Остаточный гамма процентный ресурс газопровода T_{0}^{γ} (в годах) рассчитывают по зависимости:

$$T_{o}^{\gamma} = N_{m}^{\gamma} / K_{E} - T_{H} - T_{g}.$$
(19)

Результаты расчета *ү*-процентного остаточного ресурса газопровода

Реализацию второго, третьего и четвертого этапов разработанной расчетно-экспериментальной методики проиллюстрируем на примерах прогнозирования остаточного ресурса газопровода при различных величинах реакции x_g ДДПЧ, зафиксированных за время эксплуатации газопровода с датчиком.

Кривая усталости материала трубы представлена на рис. 1. Параметры модели (1) кривой усталости: $\bar{\sigma}_b$ =602,1 МПа; Q_T =1,53·10⁶; σ_R =263,621 МПа; σ_{RT} =201,914 МПа; D= D_0 =6,006·10⁻¹¹; 9=-121,811. Коэффициенты Пуасона, линейного расширения материала и модуль его упругости имеют значения: α =1,2·10⁻⁵; μ =0,3; E=2,15·10⁵ МПа. Толщина стенки и внутренний диаметр трубы соответственно равны: δ =20 мм и $D_{\rm BH}$ =1380 мм. Гистограмма действующих в газопроводе напряжений показана на рис. 6. На рис. 7 эта гистограмма преобразована в совокупность десяти ступеней блока нагружения. Газопровод эксплуатировался в течение десяти лет ($T_{\rm H}$ =10) после чего в течение года (T_g =1) с ДДПЧ, тарировочная зависимость которого отражена на рис. 2.

На основе представленных данных осуществим решение задачи прогнозирования остаточного гамма-процентного (γ =97,5 %) ресурса газопровода при различных величинах реакции ДДПЧ (x_g). Результаты решения трансцендентного уравнения (15) относительно эквивалентного числа циклов ($N_{\Sigma g}$) нагружения газопровода отражены в таблице. При этом установленная в результате решения уравнения (18) величина эквивалентного напряжения σ_{ε} =270,300 МПа.

Таблица.Результаты расчетовTable.Calculation results

<i>x</i> g, мм (mm)	1	5	10	15	20	25
N_{Σ^g}	494,244	1,848·10 ³	2,813.103	3,402.103	$3,795 \cdot 10^{3}$	4,072·10 ³
T_{o}^{γ} , годы (years)	123,832	25,061	12,69	8,589	6,56	5,365
T_{o}^{γ} , годы (years)	102,012	19,299	8,962	5,534	3,839	2,841

В предпоследней строке таблицы показаны рассчитанные по выражению (19) значения гаммапроцентного остаточного ресурса (T_{o}^{γ}) газопровода, не имеющего коррозионные дефекты, по усталостной прочности. В качестве иллюстрации, на рис. 8 синей линией показана построенная на основе данных таблицы зависимость $T_{o}^{\gamma}(x_{s})$.



Puc. 8. Зависимость $T_{o}^{\gamma}(x_{g})$

Fig. 8. Dependence $T_0^{\gamma}(x_g)$

В том случае, когда газопровод имеет коррозионный дефект глубиной h=2 мм и длиной l=200 мм, коэффициент концентрации $\varphi(h,l)$, входящий в формулу (4), на основании зависимостей работы [32], имеет значение $\varphi(h,l)=1,035$. Выполненные по вышеизложенной методике расчеты величины $T_o^{\gamma}(x_g)$ для этого случая при вариации x_g представлены в последней строке таблицы и на рис. 8 полученная функция $T_o^{\gamma}(x_g)$ показана красной линией. Определенная в результате решения уравнения (18) величина эквивалентного напряжения $\sigma_E=279,771$ МПа. Из анализа рис. 8 следует, что наличие коррозионного дефекта глубиной h=2 мм и длиной l=200 мм уменьшает в 1,5...1,7 раза остаточный гамма-процентный (γ =97,5 %) ресурс газопровода. Это снижение остаточного ресурса соответствует всем коррозионным дефектам глубиной *h* и длиной *l*, величина которых соответствует решению уравнения $\varphi(h,l)$ =1,035.

Заключение

Для решения задачи оценки остаточного ресурса газопровода по усталостной прочности разработана методика, основанная на комплексном использовании кинетической теории механической усталости, учитывающей накопление повреждений в процессе циклического деформирования изделий, методов непараметрической статистики, обеспечивающих восстановление функции плотности распределения напряжений независимо от сложности закона их изменения в процессе эксплуатации газопровода, оригинальных средств измерения циклических деформаций - датчиков деформаций переменной чувствительности. Рассмотрены основные этапы реализации метода. На основе зафиксированной в процессе эксплуатации газопровода величины перемещения границы реакции (первых «темных пятен») на датчике и разработан-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Оценка безопасности и прочностной надежности магистральных трубопроводов методами непараметрической статистики / В.Н. Сызранцев, В.В. Новоселов, П.М. Созонов, С.Л. Голофаст. – Новосибирск: Наука, 2013. – 218 с.
- Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 516 с.
- Kapur K.C., Lamberson L.R. Reliability in Engineering Design. New York: John Wiley & Sons, 1977. – 586 p.
- Collins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. – New York: John Wiley & Sons, 1981. – 630 p.
- Целостность и безопасность трубопроводных систем / С.А. Тимашев, А.В. Бушинская, М.Г. Малюкова, Л.В. Полуян. – Екатеринбург: Уральское отделение Российской Академии Наук, 2013. – 590 с.
- Vapnik V. An overview of statistical learning theory // IEEE Transactions on Neural Networks. - 1999. - V. 10. - Iss. 5. -P. 988-999.
- Орлов А.И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2004. 656 с.
- Simakhin V.A. Nonparametric robust regression estimate // Proceedings SPIE. 2006. V. 6522. P. 130–139.
- Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // Annals of Mathematical Statistics. - 1962. - V. 33. - № 3. -P. 1065-1076.
- Rozenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density functions // Annals of Mathematical Statistics. - 1956. -V. 27. - № 3. - P. 832-837.
- Когаев В.П., Гадолина И.В. Расчет деталей машин при нерегулярном режиме нагружения // Машиноведение. 1991. № 5. С. 45–50.
- Fowler S., Toumpis A., Galloway A. Fatigue and bending behaviour of friction stir welded DH36 steel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – V. 84. – Iss. 9. – P. 2659–2669. DOI: 10.1007/s00170–015–7879–3.
- Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.

ных в рамках кинетической теории усталости уравнений получены математические зависимости для решения задачи определения эквивалентных по повреждающему воздействию чисел циклов нагружения для восстановления длительности ступеней блока напряжений, расчета эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений.

На примере обработки экспериментальных данных по величине возникающих при работе газопровода давлений и температуры рассмотрена процедура получения зависимости его остаточного гамма-процентного ресурса по усталостной прочности от зафиксированной на датчике реакции. Данная зависимость позволяет оперативно количественно оценивать остаточный ресурс различных участков газопровода в условиях эксплуатации. Представлен вариант расчета остаточного ресурса газопровода при наличии в нем коррозионного дефекта. Установлено, что дефекты глубиной h и длиной l, при которых вызываемый дефектами коэффициент концентрации напряжений соответствуют значению $\phi(h,l)=1,035$, снижают остаточный ресурс газопровода в 1,5...1,7 раза.

- Даль В. Поведение стали при циклических нагрузках. М: Металлургия, 1982. 568 с.
- Susmel L., Lazzarin P. A bi-parametric Wöhler curve for high cycle multiaxial fatigue assessment // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2002. – V. 25. – P. 63–78. DOI: 10.1046/j.1460–2695.2002.00462.x
- Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // International Journal of Fatigue. – 2003. – V. 25. – P. 679–702.
- Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
- Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Обработка данных многоцикловых испытаний на основе кинетической теории усталости и методов непараметрической статистики: монография. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного нефтегазового университета, 2015. – 135 с.
- Почтенный Е.К. Оценка циклической прочности деталей машин // Вестник машиностроения. – 1969. – № 9. – С. 11–15.
- Sonawane M.S., Dhawale C.A. Evaluation and analysis of few parametric and nonparametric classification methods // Proc. 2nd International Conference on Computational Intelligence and Communication Technology (CICT 2016). – Ghaziabad, India, 2016. – Article number 7546567. – P. 14-21. DOI: 10.1109/CICT.2016.
- Liu Y., Zhang J., Zhao X. A new nonparametric screening method for ultrahigh-dimensional survival data // Computational Statistics and Data Analysis. - 2018. - V. 119. - P. 74-85.
- A nonparametric test for slowly-varying non stationarities / D. Baptista de Souza, J. Chanussot, A-C. Favre, P. Borgnat // Signal Processing. - 2018. - V. 143. - P. 241-252.
- Lindsey J.K. Introduction to Applied Statistics: a Modelling Approach. 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004. 336 p.
- 24. Maronna R., Martin D., Yohai V. Robust Statistics: Theory and Methods. – NY: John Wiley and Sons, 2006. – 198 p.
- 25. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Сызранцева К.В. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 188 с.

- Голофаст С.Л. Диагностика работоспособности передач Новикова датчиками деформаций интегрального типа / под ред. В.Н. Сызранцева. – Новосибирск: Наука, 2004. – 164 с.
- Investigation of various criteria for evaluation of aluminum thin foil «smart sensors» images / S.V. Panin, A.V. Eremin, P.S. Lyubutin, M.V. Burkov // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – Article Number 012024.
- Investigation of sensitivity of aluminum foil based strain sensors at fatigue damage evaluation of CFRP / M.V. Burkov, S.V. Panin, P.S. Lyubutin, A.V. Eremin // Adv. Mater. Res. - 2014. -V. 1040. - P. 943-948.
- Syzrantsev V., Syzrantseva K. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges // IOP Conference Series: Material Science and Engineering 2016. V. 127. Article Number 012051.
- 30. Способ изготовления датчиков для контроля циклических деформаций: пат. Рос. Федерация № 2209412; заявл. 11.03.2001, опубл. 27.07.2003. Бюл. № 21. 4 с.
- 31. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Определение напряжений и остаточного ресурса по показаниям датчика деформаций интегрального типа переменной чувствительности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 82–93.
- 32. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями / И.Н. Бирилло, А.Я. Яковлев, Ю.А. Теплинский, И.Ю. Быков, В.Н. Воронин / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. И.Ю. Быкова. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 168 с.

Поступила: 11.12.2018 г.

Информация об авторах

Сызранцев В.Н., доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета.

Сызранцева К.В., доктор технических наук, доцент кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета.
UDC 621. 621.01/.03

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHOD FOR EVALUATING GAS PIPELINE RESIDUAL SERVICE LIFE BY FATIGUE STRENGTH

Vladimir N. Syzrantsev¹,

v_syzrantsev@mail.ru

Ksenia V. Syzrantseva¹,

kv.syzr@gmail.com

¹ Tyumen Industrial University,

38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance. Under operating conditions gas pipelines work at a time variable pressure level (in general, at a random level with unknown distribution law) and change (random variation relative to the annual trend) of ambient temperature. Due to the mentioned conditions, the stresses occurring in pipe walls are not described by the laws proposed and studied in the framework of the theory of parametric statistics. The basis for predicting a gas pipeline life is the pipe material fatigue curve connecting the amplitude of the actual stresses with the number of cycles of the tested sample deformations rather but not with the time of their operation until they are destroyed. In order to determine a gas pipeline residual service life in operation in the course of time, it is necessary to estimate a fatigue damage accumulation in its material under any law of stress distribution, regardless of its complexity. Currently, there are no methods for predicting gas pipeline residual service life, taking into account the actual range of changes in external loads and the processes of fatigue damage accumulation in pipe walls. Since gas pipelines are potentially dangerous objects, the determination of their residual life by the operation time is the most important task.

The main aim of the study is to determine gas pipeline residual service life in a time span with the given non-destruction probability, when the pipeline is exposed to a random range of external loads during its operation, regardless of the range complexity, taking into account the processes of fatigue damage accumulation in the pipeline

Methods: the kinetic theory of mechanical fatigue, methods of nonparametric statistics, measurement of cyclic deformations using variable sensitivity integral strain gauges.

Results. The authors have developed a computational and experimental method based on integrated use of the kinetic theory of mechanical fatigue, taking into account damage accumulation in cyclic deformation of products, methods of nonparametric statistics, providing restoration of function of stress distribution density regardless of the complexity of the law of their changes during pipeline operation and original means of measuring cyclic deformations – variable sensitivity integral strain gauges. The main stages of the method implementation was considered. The authors obtained the mathematical relations for determining the number of loading cycles, equivalent by damaging effect, to restore the duration of the stages of the stresses aggregate and to calculate the stresses, equivalent by damaging effect, according to the recorded by the gauge value of displacement of its response limits (the first «dark spots») during the gas pipeline operation based on the equations developed in the framework of the kinetic theory of fatigue. On the example of the method implementation, a relationship of gas pipeline residual life defined by the gauge response was established, which allows estimating quickly the residual service life of various sections of a gas pipeline under operating conditions. The paper demonstrates an alternative use of the method results to determine the effect of different amounts of gas pipeline corrosion defects on its residual service life.

Key words:

Gas pipeline, variable sensitivity integral strain gauges, mechanical fatigue theory, equivalent numbers of cycles, equivalent stresses, residual service life.

REFERENCES

- Syzrantsev V.N., Novoselov V.V., Sozonov P.M., Golofast S.L. Otsenka bezopasnosti i prochnostnoy nadezhnosti magistralnykh truboprovodov metodami neparametricheskoy statistiki [Assessment of safety and strength reliability of the transfer pipelines by methods of nonparametric statistics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 218 p.
- Makhutov N.A., Permyakov V.N. Resurs bezopasnoy ekspluatatii sosudov i truboprovodov [Resource of safe operation of vessels and pipelines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 516 p.
- Kapur K.C., Lamberson L.R. Reliability in Engineering Design. New York, John Wiley & Sons, 1977. 586 p.
- Collins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. New York, John Wiley & Sons, 1981.
 630 p.
- Timashev S.A., Bushinskaya A.V., Malukova M.G., Poluyan L.V. Tselostnost i bezopasnost truboprovodnykh sistem [Integrity and safety of pipeline systems]. Ekaterinburg, Ural branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013. 519 p.
- Vapnik V. An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, vol. 10, Iss. 5, pp. 988–999.

- Orlov A.I. Prikladnaya statistika [Applied statistics]. Moscow, Examen Publ., 2006. 671 p.
- Simakhin V.A. Nonparametric robust regression estimate. Proceedings SPIE, 2006, vol. 6522, pp. 130–139.
- Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. Annals of Mathematical Statistics, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1065-1076.
- Rozenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density functions. Annals of Mathematical Statistics, 1956, vol. 27, no. 3, pp. 832-837.
- Kogaev V.P., Gadolina I.V. Analysis of machine parts in unsteadystate loading conditions. *Mashinovedenie*, 1991, Iss. 5, pp. 45–50.
- Fowler S., Toumpis A., Galloway A. Fatigue and bending behaviour of friction stir welded DH36 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 84, Iss. 9, pp. 2659–2669. DOI: 10.1007/s00170-015-7879-3.
- Kogaev V.P., Drozdov Y.N. Prochnost i iznosostoykost detaley mashin [Strength and durability of machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 319 p.
- Dal V. Povedenie stali pri tsiklicheskikh nagruzkakh [Steel behavior under cyclic loads]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 568 p.

- Susmel L., Lazzarin P. A bi-parametric Wöhler curve for high cycle multiaxial fatigue assessment. *Fatigue & Fracture of Engine*ering Materials & Structures, 2002, vol. 25, pp. 63–78. DOI: 10.1046/j.1460-2695.2002.00462.x
- Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*, 2003, vol. 25, pp. 679–702.
- 17. Pochtenny E.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti i diagnostika ustalosti mashin* [Longevity forecasting and fatigue diagnostics of machines]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 246 p.
- Syzratnsev V.N., Syzrantseva K.V. Obrabotka dannykh mnogotsiklovykh ispytaniy na osnove kineticheskoy teorii ustalosti i metodov neparametricheskoy statistiki [Data processing of high-cycle tests on the basis of the kinetic theory of fatigue and methods of nonparametric statistics]. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., 2015. 135 p.
- Pochtenny E.K. Otsenka tsiklicheskoy prochnosti detaley mashin [Estimation of cyclic durability of machine parts]. *Russian Engineering Research*, 1969, no. 9, pp. 11–15.
- Sonawane M.S., Dhawale C.A. Evaluation and analysis of few parametric and nonparametric classification methods. Proc. 2nd International Conference on Computational Intelligence and Communication Technology (CICT 2016). Ghaziabad, India, 2016. Article number 7546567. pp. 14–21. DOI: 10.1109/CICT.2016.
- Liu Y., Zhang J., Zhao X. A new nonparametric screening method for ultrahigh-dimensional survival data. *Computational Stati*stics and Data Analysis, 2018, vol. 119, pp. 74–85.
- Baptista de Souza D., Chanussot J., Favre A-C., Borgnat P. A nonparametric test for slowly-varying non stationarities. Signal Processing, 2018, vol. 143, pp. 241–252.
- Lindsey J.K. Introduction to Applied Statistics: a Modelling Approach. 2nd ed. Oxford, UK, Oxford University Press, 2004. 336 p.
- Maronna R., Martin D., Yohai V. Robust Statistics: Theory and Methods. NY, John Wiley and Sons, 2006. 198 p.
- Syzrantsev V.N., Golofast S.L., Syzrantseva K.V. Diagnostika nagruzhennosti i resursa detaley transmissiy i nesushchikh si-

stem mashin po pokazaniyam datchikov deformatsiy integralnogo tipa [Diagnostics of loading and resource of parts of machines transmissions and carrying systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 188 p.

- 26. Golofast S.L. Diagnostika rabotosposobnosti peredach Novikova datchikami deformatsiy integralnogo tipa [Serviceability diagnostics of Wildhaber-Novikov gearings by integral strain gauges]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 164 p.
- 27. Panin S.V., Eremin A.V., Lyubutin P.S., Burkov M.V. Investigation of various criteria for evaluation of aluminum thin foil «smart sensors» images. *IOP Conference Series: Material Science* and Engineering, 2014, vol. 66, Article Number 012024.
- Burkov M.V., Panin S.V., Lyubutin P.S., Eremin A.V. Investigation of Sensitivity of Aluminum Foil Based Strain Sensors at Fatigue Damage Evaluation of CFRP. *Adv. Mater. Res*, 2014, vol. 1040, pp. 943–948.
- Syzrantsev V., Syzrantseva K. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2016, vol. 127, Article Number 012051.
- Syzrantsev V.N. Sposob izgotovleniya datchikov dlya kontrolya tsiklicheskikh deformatsiy [Method for manufacturing sensors for monitoring cyclic deformations]. Patent RF, no. 2209412, 2003.
- 31. Syzrantsev V., Syzrantseva K. Determination of stresses and residual life in accordance with indications of variable-sensitivity integral strain gauge. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, Iss. 9, pp. 82–93. In Rus.
- 32. Birillo I.N., Yakovlev A.Ya., Teplinskiy Yu.A., Bykov I.Yu., Voronin V.N. Otsenka prochnostnogo resursa gasoprovodnykh trub s korrozionnymi povrezhdeniyami [Assessment of strength resource of gas pipelines with corrosive damages]. Ed. by Prof. I.Yu. Bykov. Moscow, CentrLitNefteGaz Publ., 2008. 168 p.

Received: 11 December 2018.

Information about the authors

Vladimir N. Syzrantsev, Dr. Sc., full professor, Honorary worker of science of the Russian Federation, head of the department «Machines and equipment of oil and gas industry», Tyumen Industrial University.

Ksenia V. Syzrantseva, Dr. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

УДК 620.179.1:622.692.23

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Федосов Артем Васильевич¹,

fedsv-artem@rambler.ru

Абдрахманов Наиль Хадитович¹,

pbot@mail.ru

Вадулина Надежда Вячеславовна¹,

momus7@mail.ru

Хафизова Дильбар Фанилевна¹,

dilbarkhafizova@gmai.com

Абдрахманова Карина Наилевна¹,

akarinan@mail.ru

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

Актуальность исследования обусловлена постоянным ростом числа резервуарных парков, выработавших установленный срок эксплуатации и являющихся морально и технически устаревшими, что неизбежно приводит к отказам оборудования и авариям на нефтегазовых объектах, в том числе наносит непоправимый вред экологии и жизни работников. В условиях ограниченных экономических рамок и трудностей ремонтно-восстановительных работ без вывода оборудования из эксплуатации предотвратить аварийные ситуации возможно лишь при проведении технического диагностирования и постоянного анализа состояния резервуаров с помощью дистанционного мониторинга.

Цель: разработка и предложение метода неразрушающего контроля резервуара, позволяющего определять возможность его дальнейшей эксплуатации без остановки плановой работы, планировать дальнейший порядок ремонтных работ и оставшийся срок безопасной службы.

Объекты: резервуар вертикальный стальной, акустико-эмиссионный метод контроля, инфраструктура резервуарного парка предприятия, дистанционные методы контроля оборудования.

Методы: анализ нормативно-технических документов, прогнозные построения на предмет выявления опасных участков на резервуарах вертикальных стальных, моделирование беспроводной системы передачи данных.

Результаты. Установлено, что с применением низкотемпературного режима нагружения резервуара при акустико-эмиссионном методе контроля с добавлением беспроводной GSM системы мониторинга можно существенно повысить безопасность эксплуатации резервуарных парков и оценить остаточный ресурс резервуаров.

Выводы. С помощью акустико-эмиссионного контроля с низкотемпературным нагружением локальных участков резервуара, а также постоянного дистанционного мониторинга резервуаров нефтебазы, применяя беспроводную передачу информации по технологии GSM в режиме реального времени можно существенно уменьшить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова:

Промышленная безопасность, резервуар вертикальный стальной, акустико-эмиссионный метод контроля, дистанционный мониторинг, GSM система, документоориентированная система управления базами данных.

Введение

Состояние резервуаров вертикальных стальных (PBC) на нефтегазовых объектах характеризуется высоким износом (около 90 %). Большая часть резервуаров все еще продолжает эксплуатироваться, увеличивая вероятность возникновения аварийных ситуаций на предприятиях [1].

При отсутствии достаточных инвестиций для реконструкции и ремонта систем хранения нефти, а также ввиду длительности и трудоемкости строительства новых резервуаров, решением проблемы является продление ресурса существующих резервуаров путем проведения своевременного технического диагностирования и постоянного мониторинга нефтебазы.

Обзорный анализ нормативно-методических документов по техническому диагностированию PBC показал, что методы неразрушающего контроля (НК), использующиеся в настоящее время, такие как рентгенография, ультразвуковая толщинометрия, капиллярные, магнитные и другие виды контроля, направлены на поиск и нахождение дефектов, образовавшихся в результате эксплуатации резервуара [2]. Структура металла претерпевает необратимые изменения, поэтому необходимо определять дефекты еще на раннем этапе их развития.

В настоящее время необходимость введения и использования новых подходов к традиционным методам контроля является актуальной задачей. К таким методам относится прежде всего акустико-эмиссионный (АЭ) контроль [3, 4].

Акустико-эмиссионный контроль

АЭ метод контроля позволяет выявлять и регистрировать акустические волны, возникающие в

процессах деформирования, связанных с ростом дефектов и структурными превращениями в металле. С помощью этого метода можно своевременно выявлять развивающиеся дефекты сварных соединений и основного металла, а также определять степень опасности дефекта и скорость его развития [5, 6].

Чем больше деформирован материал, тем выше уровень эмиссии, поэтому при проведении АЭ диагностирования в конструкциях необходимо создавать искусственную пластическую деформацию путем изменения таких рабочих параметров, как давление, уровень налива и т. д., что затратно для предприятия.

В данной работе предлагается способ АЭ контроля, который значительно сократит экономические затраты. В предлагаемом методе, так же как и при обычном методе АЭ контроля, создается пластическая деформация контролируемой поверхности, но на заранее выбранном участке, где высока вероятность возникновения дефектов. Воздействуя низкими температурами на материал можно существенно повысить выявляемость дефектов. В работах [7, 8] были проведены исследования с использованием охладителя в виде сухого льда, которые определили большую степень обнаружения дефектов металла. Сущность данного метода состоит в том, что на заранее выбранном участке РВС создается упругая деформация охлаждением поверхности с помощью сухого льда, сублимация которого начинается при минус семидесяти двух градусах по Цельсию, что исключает фиксацию ложных акустических шумов [9, 10].

Предложенным методом можно нагружать как днище резервуара, так и его стенки. Нагружение сухим льдом стен резервуара предлагается производить при помощи разборных апаловок из легких материалов, что не затруднит их установку. В пространство между стенкой и апаловкой загружается оксид углерода и проводится АЭ контроль с применением защищенных от влияния низких температур преобразователей акустической эмиссии (рис. 1). Таким образом, предлагаемый низкотемпературный метод нагружения существенно повышает производительность диагностирования, понижает экономические затраты за счет исключения дорогостоящего нагружения всего объекта, а также исключает возможность возникновения пожара и взрывов, что является важнейшим аспектом в безопасной эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО) в нефтегазовой сфере.

Дистанционный мониторинг нефтебазы

Чтобы достичь максимальной эффективности эксплуатирования PBC при минимальных затратах, предлагается обеспечить постоянный дистанционный мониторинг на нефтебазе путем модернизации приборов АЭ контроля GSM системой.

В настоящее время на нефтебазах используются примитивные системы сбора и обработки данных, вплоть до записи и обработки результатов в таких программах, как Excel [11, 12].

Вследствие этого на производстве возникают проблемы, связанные со сбором и анализом данных о количестве веществ на резервуарных парках, а также с затратами на исправление сопутствующих ошибок при расчете объемов производства и т. д. Это особенно актуально, когда парки распределены по всему предприятию или находятся в разных городах.

Исходя из возможностей новых технологий указанные проблемы можно решить с помощью беспроводной системы передачи данных с использованием технологии GSM через GSM/GPRS модемы (рис. 2) [13, 14].

Основным преимуществом подобных сетей является возможность развертывания сети без прокладки кабеля, что позволит специалистам установить необходимое оборудование непосредственно на рабочей станции, без затрагивания инфраструктуры организации. Широкая распространенность на рынке позволяет существенно уменьшить стоимость развертывания сети и гарантирует совместимость оборудования [15, 16].



Fig. 1. Tank loading with dry ice



Рис. 2. АЭ контроль с добавлением GSM системы





Рис. 3. Структура системы

Fig. 3. System hardware architecture

Передача информации по технологии GSM условно спроектирована на рис. 3.

Этапы сбора, передачи и обработки данных:

- сбор и декодирование получаемого сигнала с помощью модуля МСД;
- 2) передача данных с модуля МСД на GSM-модем по платформе RS-232;
- получение данных с РВС на сервер по сети GSM;
- 4) трансляция готовых сведений на рабочую станцию по платформе RS-232 [17, 18].

Добавление и подключение к серверной части MCД модемов, используемых на резервуарном парке, позволит одновременно контролировать все резервуары предприятия в режиме реального времени.

Разработанная архитектура также предусматривает возможность сбора данных сервером. При этом добавление АРІ-модуля существенно снизит нагрузку на рабочей станции, вынося вычисления на сервер, а оператору отправляя только результаты анализа приборов [19] Модель программного продукта системы представлена на рис. 4.



Рис. 4. Модель программного продукта системы

Fig. 4. Model of the software part of the system

Сбор и анализ данных выполняется в «виртуальном паспорте резервуара», написанном на Ruby и осуществляется либо по протоку сети GSM, либо по протоку Modbus, который в течение всего времени эксплуатации работает в режиме реального времени. Модули, использующие платформы AMQP, Node.js, формируют и выполняют обработку данных соответственно.

Структура базы данных, используемая в система, должна отражать наиболее актуальные данные – это тип резервуара, название вещества, давление и влажность в резервуаре, состояние работы устройства и т. д.

Система управления базами данных (СУБД) MongoDB представлена для ознакомления на рис. 5 и может использоваться в системе мониторинга резервуарного парка, так как содержит в себе все необходимые данные для контроля состояние резервуарного парка или нефтебазы в целом [20].

Заключение

Благодаря эффективности нахождения развивающихся дефектов с помощью акустико-эмиссионного контроля с низкотемпературным нагружением локальных участков резервуара, а также постоянного дистанционного мониторинга нефтебазы с помощью беспроводной передачи информации по технологии GSM в режиме реального времени можно существенно уменьшить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

За счет низкой стоимости и простоты в установке данной системы можно в кратчайшие сроки перейти к ее эксплуатации на реальных промышленных предприятиях.



Рис. 5. Логическая модель базы данных



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Самигуллин Г.Х., Лягова А.А. Определение предельных размеров трещиноподобных дефектов в стенке стальных вертикальных резервуаров // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 104–107.
- ГОСТ 31385-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – М: Стандартинформ, 2010. – 56 с.
- Buganova S.N. Stress pattern in the zone of the manway tie-in the wall of a cylindrical tank // Modern Science. – 2007. – № 4-1. – P. 21–26.
- ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий, классификация видов и методов. – М: Сандартинформ, 2015. – 5 с.
- 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. - Re-

vue de Institut Français du Petrole. – 2003. – V. 58. – N
e2. – P. 183–202.

- Актуальность новых подходов в исследовании причин деформаций резервуаров / П.В. Потешкин, Р.М. Тимербулатов, А.Н. Авренюк, Р.А. Сабиров, Р.В. Зиннатуллин, Е.В. Саляев, М.И. Амангулов // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 50–53.
- Большаков А.М., Андреев Я.М. Характер отказов резервуаров для хранения нефтепродуктов, эксплуатирующихся в условиях Севера по принципу плоскостных и объемных дефектов // Материалы МК «ЖиКМ». – М., 22–24 октября 2012. – М.: ИМАШ РАН, 2012. – С. 12–13.
- A model for carbon and stainless steel reinforcing bars including inelastic buckling for evaluation of capacity of existing structures / Z. Zhou, D. Lavorato, C. Nuti, G.C. Marano // COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering. -Hersonissos, Greece, 2015. - P. 876-886.
- Maleki A.P., Ziyaeifar M.K. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles // Journal of Sound and Vibration. - 2008. - V. 311. - № 1-2. - P. 372-385.
- Patkas L.A., Karamanos S.A. Variational solutions for externally induced sloshing in horizontal-cylindrical and spherical vessels // Journal of Engineering Mechanics. – 2014. – № 133. – P. 641–655.
- Оценка и обеспечение безопасности эксплуатации нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров / З.Х. Павлова, Х.А. Азметов, Н.Х. Абдрахманов, А.Д. Павлова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 132–139.
- Improving the quality of competence-oriented training of personnel at industrial enterprises / V.D. Sekerin, L.M. Gaisina, N.V. Shutov, N.Kh. Abdrakhmanov, N.E. Valitova // Quality – Access to Success. - 2018. - V. 19. - № 165. - P. 68-73.
- 13. A repair and retrofitting intervention to improve plastic dissipation and shear strength of oil tanks / D. Lavorato, C. Nuti, S. San-

tini, B. Briseghella, J. Xue // IABSE conference. Structural engineering, providing solutions to global challenges report. – Geneva, 2015. – P. 1762–1767.

- Quantification of the amplitude variability of the steel. Variability of linear and non-linear structural response of a single degree of freedom system / E. Koufoudi, C. Cornou, S. Grange, F. Dufour, A. Imtiaz // Bulletin of Earthquake Engineering. 2018. № 5. P. 202–208.
- 15. Федосов А.В., Закирова З.А., Абдрахимова И.Р. Перспективы применения риск-ориентированного подхода в области промышленной безопасности // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. УГНТУ. 2018. № 1. С. 145–161.
- Simultaneous detection of liquid level and refractive index change by using long period fiber grating sensor device / Y. Huang, B. Chen, E. Pienkowski, G. Chen, H. Xiao // Sensor and Accurator A: Physical. – 2011. – P. 34–36.
- James Khaliq S.W., Tatam R.P. Fiber-optic liquid level sensor using a long-period grating // Opt. Lett. - 2001. - V. 26. -P. 1224-1226.
- Monteiro M.S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks // Advances in Remote Sensing. - 2015. - V. 4. - № 2. - P. 119-137.
- 19. A new approach for a special assessment of the working conditions at the production factor's impact through forecasting the occupational risks / N.Kh. Abdrakhmanov, N.V. Vadulina, A.V. Fedosov, S.M. Ryamova, E.Sh. Gaisin // Man in India. 2017. V. 97. № 20. P. 495–511.
- The use of mathematical models in the assessment of the measurements uncertainty for the purpose of the industrial safety condition analysis of the dangerous production objects / A.V. Fedosov, N.Kh. Abdrakhmanov, E.Gh. Gaysin, G.M. Sharafutdinova, K.N. Abdrakhmanova, A.A. Shammatova // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. V. 10. P. 433-437.

Поступила: 16.11.2018 г.

Информация об авторах

Федосов А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университетаю

Абдрахманов H.X., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Вадулина Н.В., кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Хафизова Д.Ф., студент кафедры промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Абдрахманова К.Н., аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета. UDC 620.179.1:622.692.23

DIAGNOSIS OF VERTICAL STEEL TANKS AS A TOOL TO IMPROVE SAFETY OPERATION OF OIL AND GAS FACILITIES

Artem V. Fedosov¹,

fedsv-artem@rambler.ru

Nail Kh. Abdrakhmanov¹,

pbot@mail.ru

Nadezhda V. Vadulina¹,

momus7@mail.ru

Dilbar F. Khafizova¹,

dilbarkhafizova@gmai.com

Karina N. Abdrakhmanova¹,

akarinan@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,

1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the research is related to increasing a number of tank farms that have developed a standard operating life. It inevitably leads to equipment failure and accidents at oil and gas facilities, including irreparable harm to the environment and workers lives. Under limited economic frameworks conditions and due to difficulties of repair and restoration work without decommissioning equipment, the only way to prevent emergencies is technical diagnostics and continuous remote monitoring analysis of the tanks state.

The aim of the research is to develop and propose non-destructive testing method of a reservoir, which allows determining the possibility of its further operation without shutdown of planned work and allows planning the further repair work and safe service remaining period.

Objects: vertical steel tank, acoustic emission control method, infrastructure of the enterprise's tank farm.

Methods: analysis of regulatory-technical documents, forecasting hazardous areas allocation on vertical steel tanks, modeling of a wireless data transmission system.

Results. It was established that the use of a low-temperature mode of tank loading with addition of a wireless GSM monitoring system during acoustic emission controlling allows increasing significantly the safety of tank farms operation.

Conclusions. Acoustic emission monitoring with low-temperature loading of reservoirs local sections, as well as constant remote monitoring of the tank farm and using the real-time wireless transmission of information by GSM technology can significantly reduce the probability of emergencies.

Key words:

Industrial safety, vertical steel tank, acoustic emission monitoring method, remote monitoring, GSM system, document-oriented database management system.

REFERENCES

- Samigullin G.H., Lyagova A.A. Determination of crack-like defects limiting size in the steel vertical tanks wall. *Neftyanoe hozy-aystvo*, 2017, no. 3, pp. 104–107. In Rus.
- GOST 31385-2008. Rezervuary vertikalnye tsilindricheskie stalnye dlya nefti i nefteproduktov. obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 31385-2008.Vertical cylindrical steel tanks for petroleum and petroleum products. General regulations]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 56 p. In Rus.
- Buganova S.N. Stress pattern in the zone of the manway tie-in to the wall of a cylindrical tank. *Modern Science*, 2017, no. 4–1, pp. 21–26.
- GOST P 56542-2015. Kontrol nerazrushayushchy, klassifikatsiya vidov i metodov [State Standard 56542-2015. Non-destructive testing, classification of species and methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 5 p.
- 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 – Revue de Institut Français du Petrole, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
- 6. Poteshkin P.V., Timerbulatov R.M., Avrenyuk A.N., Sabirov R.A., Zinnatullin R.V., Salyaev E.V. The relevance of new ap-

proaches of storage tank deformation causes study. *Neftyanoe hozyaystvo*, 2017, no. 10, pp. 50–53. In Rus.

- Bolshakov A., Andreev Ya.M. Kharakter otkazov rezervuarov dlya khraneniya nefteproduktov ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh Severa po printsipu ploskostnykh i obyemnykh defektov [The nature of failures of North operating oil storage tanks according to the principle of plane and volume defects]. *Materialy MK «ZHiKM»*. Moscow, 22–24, October 2012, pp. 12–13.
- Zhou Z., Lavorato D., Nuti C., Marano G.C. A model for carbon and stainless steel reinforcing bars including inelastic buckling for evaluation of capacity of existing structures. COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineeringto Hersonissos, Greece, 2015. pp. 876-886.
- Maleki A.P., Ziyaeifar M. K. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, vol. 311, no. 1–2, pp. 372–385.
- Patkas L.A., Karamanos S.A. Variational solutions for externally induced sloshing in horizontal-cylindrical and spherical vessels. *J Eng Mech.*, 2014, no. 133, pp. 641–655.
- 11. Pavlova Z.Kh., Azmetov Kh.A., Abdrakhmanov N.Kh., Pavlova A.D. Assessment and safety of oil and gas pipelines operation

under conditions of unsteady technological parameters. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 132–139. In Rus.

- Sekerin V.D., Gaisina L.M., Shutov N.V., Abdrakhmanov N.Kh., Valitova N.E. Improving the quality of competence-oriented training of personnel at industrial enterprises. *Quality – Access to* Success, 2018, vol. 19, no. 165, pp. 68–73.
- Lavorato D., Nuti C., Santini S., Briseghella B., Xue J. A repair and retrofitting intervention to improve plastic dissipation and shear strength of oil tanks. *IABSE conference. Structural engine*ering, providing solutions to global challenges report. Geneva, 2015. pp. 1762–1767.
- 14. Koufoudi E., Cornou C., Grange S., Dufour F., Imtiaz A. Quantifcation of the amplitude variability of the steel. Variability of linear and non-linear structural response of a single degree of freedom system. *Bull Earthq Eng.*, 2018, no. 5, pp. 202–208.
- Fedosov A.V., Zakirova Z.A., Abdrahimova I.R. Perspectives of application of risk-based approach in the industrial safety area. *Neftegazovoe delo*, 2018, no. 1, pp. 145–161. In Rus.
- 16. Huang Y., Chen B., Pienkowski E., Chen G., Xiao H. Simultaneous detection of liquid level and refractive index change by using

long period fiber grating sensor. Sensor and Accurator A: Physical, 2011, pp. 34–36.

- James Khaliq S.W., Tatam R.P. Fiber-optic liquid level sensor using a long-period grating. Opt. Lett., 2001, vol. 26, pp. 1224-1226.
- Monteiro M.S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks. Advances in Remote Sensing, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 119–137.
- AbdrakhmanovN.Kh., Vadulina N.V., Fedosov A.V., Ryamova S.M., Gaisin E.Sh. A new approach for a special assessment of the working conditions at the production factor's impact through forecasting the occupational risks. *Man in India*, 2017, vol. 97, no. 20, pp. 495–511.
- 20. Fedosov A.V., Abdrakhmanov N.Kh., Gaysin E.Gh., Sharafutdinova G.M., Abdrakhmanova K.N., Shammatova A.A The use of mathematical models in the assessment of the measurements uncertainty for the purpose of the industrial safety condition analysis of the dangerous production objects. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018, vol. 10, pp. 433–437.

Received: 16 November 2018.

Iformation about the authors

Artem V. Fedosov, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Nail Kh. Abdrakhmanov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Nadezhda V. Vadulina, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Dilbar F. Khafizova, student, Ufa State Petroleum Technological University.

Karina N. Abdrakhmanova, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДИНАМИКИ МАССИВА В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Голик Владимир Иванович^{1,2},

v.i.golik@mail.ru

Комащенко Виталий Иванович³,

komashchenko@inbox.ru

Качурин Николай Михайлович4,

ecology tsu tula@ mail.ru

Стась Галина Викторовна⁵,

galina stas@mail.ru

- ¹ Северо-Кавказский государственный технологический университет, Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.
- ² Геофизический институт Владикавказского научного центра, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.
- ³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.
- ⁴ Тульский государственный университет, Россия, 300012, Тула, пр. Ленина, 92.

Актуальность. При подземной разработке скальных металлических месторождений в зоне сопряжения очистных и подготовительных выработок динамика напряжений и деформаций осложняет процессы добычи руд и снижает эффективность производства. На участке сопряжения выработок деформации в породах служат источником локальных обрушений. Исследование механизма развития напряжений и деформаций в зоне вскрытия рудного тела горными выработками позволяет скорректировать параметры очистных работ, снижая результаты негативного проявления горного давления.

Основными методами прогнозирования темпов развития горного давления являются натурные исследования с использованием геофизических и маркшейдерских методов. Полученные значения напряжений и деформаций являются основой для объективной оценки состояния массива в зоне сопряжения выработок.

Результаты. По данным натурных исследований строили графики изменения деформации крепи во времени и пространстве вокруг выработки и оценивали механизм развития горного давления под влиянием горных работ. Определено, что массив характеризуется тремя участками действующих напряжений. Установлен незначительный рост напряжений в течение первых трех месяцев очистных работ, а также более медленные темпы нарастания напряжений в породе, чем в руде. Выявлено, что добыча руд в зоне сопряжения выработок по характеру развития деформаций подразделяется на три фазы, подчиняющиеся закономерностям. **Выводы.** Установленные закономерности развития напряжения в зоне ослабления массивом позволяют прогнозировать состояние массива с достаточной для управления детализацией, что дает возможность корректировать параметры разработки с получением экономического эффекта за счет уменьшения разубоживания руд и уменьшения опасности для горнорабочих.

Ключевые слова:

Руда, разработка, напряжения, деформации, тензометрия, нивелирование, качество, безопасность.

Введение

Важным фактором повышения эффективности эксплуатации месторождений является учет и использование свойств рудовмещающих неоднородных скальных массивов. Работами М.И. Агошкова, А.А. Борисова, В.Д. Слесарева С.В. Ветрова и др. доказано, что для обеспечения сохранности массива определяющим является условие непревышения предельных напряжений в элементах геодинамической системы [1–3].

Поля напряжений и деформаций в дискретных массивах пород возникают в результате взаимодействия силовых полей при совмещении техногенных и природных факторов разработки месторождения. Эти процессы наиболее активны в зоне ослабленности при вскрытии рудного тела нарезными и очистными выработками.

Оценка и учет свойств массива позволяет оптимизировать параметры добычных работ с получением экономического эффекта от повышения качества руд и снижения расходов на управление массивом, поэтому прогнозирование механизма горного давления с детализацией динамики напряжений и деформаций является целью многих исследований [4–6]. В настоящей работе поставленная цель достигается использованием комплекса натурных исследований, включающих измерение напряжений в крепи геофизическими и маркшейдерскими методами и инженерно-геологическое районирование массива.

Результаты

Исследования выполнены в условиях сложноструктурного месторождения Восток (Северный Казахстан). Рудные залежи увязаны с мелкими разломами и крупными макротрещинами, создающими зоны трещиноватости и рассланцевания пород, включающих отдельные швы с глинкой трения и кварц-карбонатные прожилки.

Вблизи разлома аргиллиты образуют тонкие (от 1–2 до 15 мм) породные плитки, коэффициент структурного ослабления (по методу Ханзаги) которых меньше 0,1. В интервале 5–25 м от шва разлома коэффициент структурного ослабления изменяется от 0,1 до 0,15, а далее увеличивается до 0,20.

Коэффициент разрыхления руд – 1,6. Отбитая руда склонна к слеживанию и переуплотнению, что осложняет технологические процессы.

В непосредственной близости к разлому в андезитовых порфиритах отмечается зона повышенной трещиноватости, рассланцевания и березитизации мощностью 3 м. Породы здесь разбиты на плитки толщиной 1-30 мм. Коэффициент структурного ослабления снижается до величины 0,1, в то время как за пределами зоны он составляет 0,316.

В массиве месторождения выделяются северозападный, центральный и юго-восточный инженерно-геологические районы, различающиеся нарушенностью, ослабленностью, прочностью и устойчивостью пород. Внутри районов выделяются инженерно-геологические элементы, характеризующиеся сходностью свойств и состояния пород и руд: зона разлома, зоны его влияния в крыльях разлома, внутренние средненарушенные части и участки с незначительным влиянием разлома.

Одним из способов исследования динамики нагрузки на жесткую металлическую арочную крепь подготовительных выработок были измерения с помощью тензометрических датчиков. Кроме того, изменение размеров сечения крепи определялось путем измерения расстояний между заложенными в крепь реперами маркшейдерскими съемками.

Тензометры и маркшейдерские реперы размещали на установленной в выработках крепи.

В выработке № 1 на жесткой металлической крепи участка длиной 13 м установлены металлические рамы с интервалом 0,5 м друг от друга. В выработке № 2 установлено 9 металлических рам с интервалом 1 м.

Замерная тензометрическая станция была размещена на 5 металлических рамах в выработке № 1. На каждой раме оборудовано 9 замерных точек, в каждой из которых располагались три датчика, наклеенные на три плоскости спецпрофиля. Деформации пород регистрировались тензометрической аппаратурой.

По измеренным деформациям $\xi_{/0}, \xi_{/1}, \xi_{/2}$ определяли главные деформации:

$$\xi_{1,2} = \frac{\xi_{f_2} + \xi_{f_1}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\xi_{f_2} - \xi_{f_1})^2 + (\xi_0 - \xi_{f_1})^2}$$

и угол φ между направлениями ξ_{t^0} и ξ_{t^1}

$$\mathrm{tg}\varphi_{0} = \frac{\xi_{f_{1}} - \xi_{f_{2}}}{2\xi_{0} - \xi_{f_{1}} - \xi_{f_{2}}} \mathrm{tg}\varphi_{1}$$

Главные напряжения в исследуемой точке на основании закона Гука:

$$\sigma_{1} = \frac{E}{1-\mu^{2}} (\xi_{1} + \mu \xi_{2}),$$

$$\sigma_{2} = \frac{E}{1-\mu^{2}} (\xi_{2} + \mu \xi_{1}),$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Нормальные напряжения σ_z – вертикальное и σ_x – горизонтальное:

 $\sigma_{z} = \sigma_{1} \sin \alpha - \sigma_{2} \sin \alpha,$ $\sigma_{r} = \sigma_{1} \sin \alpha - \sigma_{2} \sin \alpha.$

По измеренным главным напряжениям строили эпюры напряжений вокруг выработки, что было основанием для оценки ослабленности массива под влиянием горных работ (рис. 1).



Рис. 1. Эпюры напряжений σ_x : 4–24 – тензометрические датчики; 1–5 – замеры

Fig. 1. Stress diagrams σ_z : 4-24 - strain gauges; 1-5 - measurements

Из рисунка видно, что распределение напряжений при всем разбросе значений подчиняется общей закономерности и кривые графика по форме близки.

В районе очистных блоков были пробурены скважины, ориентированные относительно сланцеватости пород и направления отработки. Величину напряжений измеряли частотными датчиками по изменению частоты генерируемых импульсов. В скважинах устанавливали датчики смещения стенок скважин, показания которых регистрировали тензометрической аппаратурой [7–9].

Результаты

На основании данных маркшейдерского нивелирования (рис. 2, 3) процесс очистных работ по характеру развития деформаций можно подразделить на три фазы.



Рис. 2. Зависимость деформации арки металлической крепи выработки от времени: 17, 21, 25, 27 – рамы **Fig. 2.** Dependence of mine metal support arch deformation on time: 17, 21, 25, 27 – frames



Рис. 3. Зависимость деформации арки металлической крепи выработки от времени: 1, 3, 6, 8 – рамы **Fig. 3.** Dependence of working metal roof support arch deformation on time: 1, 3, 6, 8 – frames

Из рис. 2, 3 видно, что деформации в крепи активизируются по истечение трех месяцев, устойчиво сохраняя тренд увеличения со временем. Это можно объяснить релаксационными явлениями при восприятии давления на крепь. Деформации усиливаются начиная с 4-6 месяца и достигают максимума по истечение 11-12 месяцев.

Первая фаза – начало отработки блока. Деформации крепи увеличились с 2 до 16 мм (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость деформаций крепи выработки от ее длины в первой фазе: 1-4 – измерения, 1-27 – рамы

 $Fig. \ 4. \quad Dependence \ of \ working \ support \ deformation \ on \ its \ length \ in \ the \ first \ phase: 1-4-measurements, 1-27-frames$

Из рис. 4 следует, что развитие деформаций носит не монотонный характер. Так, наибольшая деформация рамы № 11 составила 19 мм, отражая влияние разлома.

Вторая фаза – отрезка рудного тела со стороны висячего бока. Третья фаза – развитие деформаций крепи в процессе выемки руды характеризуется интенсивным деформированием крепи. Если вне зоны очистных работ деформации были незначительными, то при выемке руды средние деформации по 27 арок в течение 1,2 и 3 месяцев по данным датчиков увеличивались до 43, 119, 128 мм, соответственно. Ширина выработки на высоте 0,5 м от почвы за первый месяц уменьшилась на 85 мм и за второй месяц – на 175 мм.

Максимальные деформации металлической арочной крепи отмечены у близко расположенных к очистному забою рам и у рамы № 4 в районе разлома. Спустя 6 месяцев деформации в верхней арке рамы № 4 составили 233 мм, а ширина крепи на расстоянии 0,5 м от почвы увеличилась на 55 мм. Рама № 19 в это время разошлась по замкам и вышла из строя. Центр верхней арки рамы опустился на 432 мм, ширина по замкам увеличилась на 312 мм. В верхней арке рамы № 8 деформации составляли 340 мм.

Максимальные деформации крепи в выработке № 2 наблюдались у близких к очистному забою рам и у рамы № 4 в зоне разлома (рис. 5).

Из рисунка видно, что усиление влияния очистных работ на состояние крепи зафиксирова-

но с приближением фронта работ на расстояние 12 м.

Давление на крепь возрастало по мере приближения очистных забоев сначала медленно, а на расстоянии 20 м от висячего бока к лежачему – интенсивно.

Из результатов измерений следует, что изменение состояния крепи в зависимости от фазы развития очистных работ подчиняется закономерности [10–12].

Пока рудное тело в пределах блока ведет себя как защемленная в висячем и лежачем боках балка, напряжения по контуру рамы распределяются равномерно. После отрезки рудного тела со стороны висячего бока нагрузка на верхний элемент крепи со стороны очистных работ возрастает.

Результаты измерений напряжений частотными датчиками приведены в табл. 1.

 Таблица 1.
 Динамика напряжений и деформаций

 Table 1.
 Dunamics of stresses and deformations

Mecяцы Months	Деформации, мм Deformations, mm				Напряжения, МПа Stresses, MPa			
	Номера датчиков Sensor numbers				Номера датчиков Sensor numbers			
	4	10	3	7	24	44	11	
1	0,9	0,15	0,24	0,09	-	-	-	
2	3,6	0,55	0,21	0,22	2,3	0,12	0,04	
3	-	2,2	0,26	0,24	9,7	2,35	0,85	
4	-	-	0,50	0.26	7,65	5,1	2,65	
5	-	-	0,90	0,62	-	6,35	3,6	
6	-	-	1,00	0,8	-	-	3,7	



Деформация, мм

Рис. 5. Зависимость деформаций крепи выработки от ее длины в зоне взаимодействия выработок: 1-6 – наблюдения

Fig. 5. Dependence of mine lining deformation on its length in the interaction zone of the mine: 1-5 – observations

Динамика отработки рудного участка отображена в табл. 2.

Таблица 2. Динамика отработки рудного участка площадью 1065 м²

Mecяцы Months	Площадь с нарастанием, м ² Area with increase, m ²	Maccoвaя доля отработки, % Mass fraction of mining, %	Доля от общей площади Share of total area	
1	154	14,5	0,14	
2	190-344	17,8-32,0	0,32	
3	298-642	28,2-60,0	0,60	
4	226-868	21,2-81,2	0,81	
5	197-1065	18,5-100	1,00	

Table 2.Dynamics of mining ore area of $1065 m^2$

Установлено, что при прочих равных условиях, например, расстоянии от зоны влияния очистного пространства, рудные целики испытывают большие деформации, чем породный массив (рис. 6).

О геодинамике массива при добыче руд дает представление соотношение массы обрушенных пород и напряжений в зоне концентрации или в целике [13–15]. В процессе очистной выемки на площади длиной L и шириной l действует нагрузка Q, вызванная массой вышележащих пород (γH):

$Q = Ll\gamma H$.

Расшифровка дана в тексте выше.

В данном случае $\gamma H=98$ МПа. Если допустить, что влияние очистной выемки распространяется на той же длине l, то нагрузку можно описать выражением:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

где Q_1 – нагрузка массой вышележащих обрушенных пород; Q_2 – техногенная нагрузка.

Рост нагрузки в зоне концентрации напряжений составляет 15–20 % от гравитационной составляющей, или 39 МПа, что менее предела прочности пород на сжатие – 54–75 МПа.

Наблюдения за состоянием породного массива указывают на незначительный рост деформаций и напряжений в течение первых трех месяцев очистных работ. Напряжения в породном массиве возрастают медленнее, чем в руде. По окончанию очистных работ напряжения и деформации в массиве стабилизируются.

Участок сопряжения подготовительных и очистных работ характеризуется возникновением зоны ослабления пород размерами:

- длина в зависимости от угла наклона мощного рудного тела и расположения тектонических структур, ориентировочно, 30 и более метров в лежачем боку и порядка 10 м в висячем боку;
- ширина: при отработке вкрест простирания рудного тела – ширина секции очистного блока, при отработке по простиранию – вынимаемая мощность рудного тела;
- высота: расстояние по вертикали до границ образующегося свода естественного равновесия пород.

Обрушение пород в пределах зоны сопряжения может быть предотвращено креплением выработок, параметры которого определяются взаимодействием пород в пределах свода:

 при достаточной силе распора заклинившихся пород в кровле выработки может быть применена облегченная крепь;



Рис. 6. Зависимость деформации стенок скважин от времени: 3, 4, 7, 10 – номера датчиков, 1–6 – наблюдения

- Fig. 6. Dependence of deformation of the well walls on time: 3, 4, 7, 10 sensor numbers, 1-6 observations
- при недостаточной силе распора крепление выработки должно рассчитываться из условия поддержания столба пород высотой до дневной поверхности или образования нового свода естественного равновесия.

При вскрытии рудного тела со стороны висячего бока в неустойчивых породах к отбиваемой руде примешиваются породы, снижающие качество до-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

- Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101–114.
- Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – Путь длиной в 65 лет // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 6–12.
- Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, V. Zaalishvili // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - V. 7. - № 4. -P. 325-329.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremenkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368.
- Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Y.J. Ping, C.W. Zhong, Y.D. Sen, Y.J. Qiang // Computers and Geotechnics. - 2015. -V. 64. - P. 20-31.
- Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process // Environmental Science and Pollution Research. - 2013. - V. 20. - № 11. - P. 7777-7786.
- Еременко В.А., Лушников В.Н. Методика выбора «динамической» крепи выработок для месторождений склонных и опасных по горным ударам // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 5–12.
- Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // Solid Earth. - 2014. - № 5. - P. 1123-1149.
- Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Y.J. Ping, C.W. Zhong,

бываемой руды. Минимизация этого негативного фактора обеспечивается применением известных специальных методов: превентивное упрочнение висячего бока анкерами, опережающей отработкой с закладкой твердеющими смесями, оставлением на границе блока целиков с увеличением потерь и т. п.

Эффективность использования породных конструкций складывается из экономии труда и материалов на управление состоянием скальных массивов при подземных работах [16–18].

Оптимизация влияния напряжений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок уменьшает разубоживание руд породами и снижает опасность травмирования работающих отлаивающимися породами [19–21].

Заключение

При подземной разработке сложноструктурных металлических месторождений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок величина и знак напряжений во времени и пространстве могут быть прогнозированы с достаточной для оперативного управления детализацией.

Учет геомеханических факторов при отработке таких участков позволяет корректировать параметры разработки с получением экономического эффекта от повышения качества добываемых руд и уменьшения опасности для работающих.

Y.D. Sen, Y.J. Qiang // Computers and Geotechnics. - 2015. - V. 64. - P. 20-31.

- Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В. Исследование конструкции и параметров комбинированной системы разработки наклонного месторождения кварца // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 87–99.
- Смирнов С.М., Татарников Б.Б., Александров А.Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 45–51.
- Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). – USA: Verlag, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. – 875 p
- Shabanimashcool M., Li C.C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – V. 79. – P. 99–108.
- 14. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining / D.S. Wang, J.P. Chang, Z.M. Yin, Y.G. Lu // Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proc. of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. – USA, 2014. – P.451–457.
- Развитие геомеханики для решения проблем сохранения земных недр / М.А. Иофис, Е.В. Федоров, Е.Н. Есина, Н.А. Милетенко // Горный журнал. 2017. № 11. С. 98–104.
- Khasheva Z.M., Golik V.I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus // International Business Management. - 2015. - V. 9. - № 6. -P. 1210-1216.
- Metal deposits combined development experience / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - V. 7. - № 6. - P. 591-594.

- Karaman K., Cihangir F., Kesimal A. A comparative assessment of rock mass deformation modulus // International Journal of Mining Science and Technology. - 2015. - V. 25. - Iss. 5. -P. 735-740.
- Перспективы комплексного освоения Бакчарского железорудного месторождения (Западная Сибирь, Россия) / М.А. Рудмин, А.К. Мазуров, И.В. Рева, М.Д. Стеблецов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 87–99.
- Мухаметшин В.В., Андреев В.Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на рас-

ширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 26–30.

 Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 121–125.

Поступила 04.10.2019 г.

Информация об авторах

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

Комащенко В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Качурин Н.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехнологий и строительства подземных сооружений Тульского государственного университета.

Стась Г.В., доктор технических наук, доцент кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений Тульского государственного университета.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

RESEARCH OF ARRAY GEODYNAMICS IN THE INTERFACE OF CLEANING AND PREPARATORY WORKS

Vladimir I. Golik^{1,2},

v.i.golik@mail.ru

Vitaly I. Komashchenko³,

komashchenko@inbox.ru

Nikolay M. Kachurin⁴,

ecology tsu tula @ mail.ru

Galina V. Stas⁴,

galina stas@mail.ru

- ¹ North Caucasus State Technological University, 44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.
- ² Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center, 93A, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.
- ³ Belgorod State National Research University, 85, Pobedy street, Belgorod, 308015, Russia.
- ⁴ Tula State University, 92, Lenin avenue, Tula, 300012, Russia.

Relevance. At underground mining of rocky metal deposits in the junction zone of treatment and preparatory workings, the dynamics of stresses and strains complicates ore mining and reduces production efficiency. At the site of conjugation of workings, deformations in rocks serve as a source of local collapses. The study of the mechanism of development of stresses and deformations in the zone of ore body opening by mine workings allows adjusting the parameters of the cleaning works, reducing the results of the negative manifestation of rock pressure.

The main methods of predicting the rate of development of rock pressure are field studies using geophysical and surveying methods. The obtained values of stresses and strains are the basis for an objective assessment of the state of the array in the junction area of the workings.

Results. According to the field studies, the authors have constructed the graphs of changes in the support lining in time and space around the mine and assessed the mechanism of rock pressure development under the influence of mining. It is determined that the array is characterized by three sections of the existing stresses. The authors established a slight increase in stresses during the first three months of refining, as well as a slower rate of increase of stresses in rock than in ore. It is revealed that ore extraction in the junction zone of workings is divided into three phases according to the nature of development of deformations, which obey the laws.

Findings. The established patterns of tension development in the zone of weakening by an array make it possible to predict the array state with details sufficient for controlling, that allows adjusting the development parameters to obtain the economic effect by reducing the dilution of ores and reducing the risk to workers.

Key words:

Ore, development, stress, strain, strain gauging, leveling, quality, safety.

REFERENCES

- Komashchenko V.I., Vasilev P.V., Maslennikov S.A. Underground mining technologies KMA – a reliable raw material basis. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Ze*mle, 2016, no. 2, pp. 101–114. In Rus.
- Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. AO «Leading research and scientific institute of industrial technology». The 65 years way. *Gorny zhurnal*, 2016, no. 3, pp. 6–12. In Rus.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 325-329.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremenkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings. Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 682, pp. 363–368.
- 5. Ping Y.J., Zhong C.W., Sen Y.D., Qiang Y.J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by

FEM modeling. Computers and Geotechnics, 2015, vol. 64, pp. 20-31.

- Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, no. 11, pp. 7777–7786.
- Eremenko V.A., Lushnikov V.N. The method of choosing a «dynamic» lining workings for deposits prone and dangerous for rock bumps. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2018, no. 12, pp. 5–12. In Rus.
- 8. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*, 2014, no. 5, pp. 1123–1149.
- Ping Y.J., Zhong C.W., Sen Y.D., Qiang Y.J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 64, pp. 20-31.

- Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskiy K.V. Study of the design and parameters of the combined system for the development of an inclined quartz deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, no. 328, no. 10, pp. 87–99.
- 11. Smirnov S.M., Tatarnikov B.B., Aleksandrov A.N. Influence of the geodynamic conditions of ore site mining on the technology of cleaning works with the laying of the goaf. *Gorny informatsionno*-*analiticheskiy byulleten*, 2014, no. 11, pp. 45–51. In Rus.
- Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). USA, Verlag, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. 875 p.
- Wang D.S., Chang J.P., Yin Z.M., Lu Y.G. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining. Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proc. of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. USA, 2014. pp. 451-457.
- 14. Iofis M.A., Fedorov E.V., Esina E.N., Miletenko N.A. Development of geomechanics for solving problems of preserving the earth's interior. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 11, pp. 98-104. In Rus.
- Khasheva Z.M., Golik V.I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 1210–1216.

- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 591–594.
- Karaman K., Cihangir F., Kesimal A. A comparative assessment of rock mass deformation modulus. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, vol. 25, Iss. 5, pp. 735–740.
- Rudmin M.A., Mazurov A.K., Reva I.V., Stebletsov M.D. Prospects for the integrated development of the Bakcharsky iron ore deposit (Western Siberia, Russia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 87-99.
- Muhametshin V.V., Andreev V.E. Improving the efficiency assessment of technologies aimed at expanding the use of the resource base of deposits with hard-to-recover reserves. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 26–30. In Rus.
- Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design principles and selection of subsoil development technologies ensuring the sustainable development of underground mines. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 11, pp. 121–125. In Rus.

Received: 4 October 2019.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, professor, North Caucasus State Technological University; chief researcher, Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center.

Vitaly I. Komashchenko, Dr. Sc., professor, professor, Belgorod State National Research University.

Nikolay M. Kachurin, Dr. Sc., professor, head of the department, Tula State University.

Galina V. Stas, Dr. Sc, associate professor, Tula State University.

УДК 631.422; 631.465

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЧЕРНОЗЕМА РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Минникова Татьяна Владимировна,

loko261008@yandex.ru

Сушкова Светлана Николаевна,

terra rossa@mail.ru

Манджиева Саглара Сергеевна,

msaglara@mail.ru

Минкина Татьяна Михайловна,

tminkina@mail.ru

Колесников Сергей Ильич,

kolesnikov@sfedu.ru

1 Южный федеральный университет, Россия,

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценить влияние многолетнего токсического загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами с использованием ярового ячменя (Hordeum sativum distichum) на ферментативную активность черноземов и морфометрические показатели ячменя. Яровой ячмень использовали для оценки отрицательного влияния загрязнения чернозема бензо[а]пиреном как признанным канцерогеном и мутагеном среди полициклических ароматических углеводородов. Выбранные дозы были близки к уровню техногенного давления в исследуемой зоне – 0–800 мкг кг⁻¹ бензо[а]пирена. Содержание бензо[а]пирена в почве в течение 4 лет эксперимента повлияло на морфометрические показатели ячменя и его поглощение растениями, а также на ферментативную активность почв.

Цель: оценить влияние бензо [а] пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области.

Объекты. Исследования проводились с образцом почвы, отобранным из верхнего (0–20 см) слоя чернозема обыкновенного карбонатного тяжелосуглинистого на территории Государственного почвенного заповедника «Персиановская заповедная степь», расположенного в Ростовской области (юг Российской Федерации), вдали от источников загрязнения. Данная почва имеет следующие характеристики: С_{огд} – 3,4 %, pH – 7,3, емкость катионного обмена – 37,1 ммоль (+)/100 г; содержание СаСО₃ – 0,1 %, содержание физической глины – 53,1 %.

Методы. Модельные эксперименты проводили в естественных условиях. Два килограмма воздушно-сухой почвы просеивали через сито диаметром 1 мм и помещали в вегетационные сосуды объемом 4 литра. Раствор бензо[а]пирена в ацетонитриле перемешивали с почвой для создания концентраций бензо[а]пирена в образцах почвы, равных 20, 200, 400 и 800 мкг кг⁻¹ (сухой вес), что соответствует 1, 10, 20 и 40 уровням предельно-допустимой концентрации бензо[а]пирена, соответственно. Незагрязненная почва использовалась в качестве контроля, фоновым образцом служил образец с внесением ацетонитрила аналогично образцам с бензо[а]пиреном.

Результаты. Основным фактором, обуславливающим увеличение содержания бензо[а]пирена в черноземе обыкновенном и растениях модельного эксперимента, была доза внесения токсиканта в чернозем обыкновенный. Активность оксидоредуктаз (каталазы и дегидрогеназы) чернозема была ингибирована с ростом содержания бензо[а]пирена в почве. Наибольшее токсическое действие бензо[а]пирена оказал на активность дегидрогеназ. Тенденции выраженной фитотоксичности почв наблюдали для всех морфометрических показателей ярового ячменя, таких как энергия прорастания, длина побегов, вес растений и длина колоса. Количественные уровни поглощения бензо[а]пирена в объек загрязненных вариантах. Таким образом, переход бензо[а]пирена в побеги и корни ярового ячменя из чернозема, сопровождающийся ингибированием активности дегидрогеназы и каталазы, демонстрирует оценку воздействия полютанта на живые организмы.

Ключевые слова:

Бенз (а) пирен, почва, яровой ячмень, морфометрия, активность каталазы, активность дегидрогеназ, корреляционная зависимость.

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) являются одними из наиболее существенных загрязняющих веществ окружающей среды, оказывающих мутагенное и канцерогенное воздействие на все живые организмы [1]. Содержание 16 приоритетных соединений ПАУ в объектах окружающей среды контролируется международными законами и нормативами за счет их канцерогенности, мутагенности и токсичности [2–5]. По своей физической и химической форме ПАУ достаточно гидрофобны и устойчивы в объектах окружающей среды, особенно при загрязнении почвы благодаря сложной структуре почвенной матрицы [6]. Оценка закономерностей распределения ПАУ в системе почва-растение является одним из основных показателей в системе мониторинга состояния окружающей среды [7, 8]. Бензо [а] пирен (БаП) является главным маркером загрязнения почвенно-растительной системы ПАУ [9]. Исследования особенностей накопления в системе почва-растение БаП необходимо для нормирования содержания соединения в почве и минимизации риска воздействия на компоненты экосистем и человека [10, 11]. Содержание БаП во всех экологических системах и пищевых продуктах находится под обязательным контролем во всем мире [3, 12].

Присутствие БаП в почвах, растениях и воде связано с повышенным уровнем техногенного давления. Аккумуляция БаП на поверхности почвы связана с процессами распределения в системе почва-растение и миграцией в почвенном профиле. Способность БаП к накоплению в растениях и миграции в почве в основном зависит от сорбционных свойств почвенной матрицы, а также от физических и химических свойств молекул БаП (прежде всего водорастворимости) и способности перехода в почвенный раствор [13]. Фоновое содержание БаП в растениях и большинстве минеральных почв колеблется в пределах 0,1-5 мкг кг⁻¹, тогда как для некоторых черноземов и торфяных почв характерен более высокий уровень накопления БаП – 15–20 мкг кг⁻¹. Это связано с увеличением содержания концентрированных органических веществ и специфической структурой почвенного микробного сообщества. Процесс комплексного взаимодействия почв и растений является важным объектом для контроля загрязнения окружающей среды БаП [14].

Почвенные частицы сорбируют соединения ПАУ, что вызывает высокую доступность данных соединений для растений и влияет на ферментативную активность почв [15-18]. Почвенные микробные сообщества могут вызвать разрушение ПАУ внеклеточными ферментами, такими как оксидоредуктазы [19]. Такие лигнинолитические ферменты, как пероксидаза и фенолоксидаза, изза сходных структур ПАУ и лигнина (полифенольных единиц) и их низкой субстратной специфичности способны окислять подобные органические загрязнители. Усиление активности окислительновосстановительных ферментов может быть обусловлено ростом числа микробных сообществ, ответственных за деградацию и трансформацию органических загрязнителей почвы, что вызвано добавлением доступного источника углерода.

Ризосфера почв оказывает стимулирующее действие на почвенные микроорганизмы, в том числе почвенные ферменты. Показано, что в ризосфере присутствует повышенное количество микроорганизмов по сравнению с остальной почвой [20]. Наиболее оптимальным подходом в целях фиторемедиации является увеличение объема корневой системы за счет тонких прикорневых волосков [21, 22]. Ризоремедиация – это тип процесса фиторемедиации с использованием микроорганизмов, который вызывает деградацию загрязняющих веществ [23].

Благодаря своей химической структуре ПАУ при попадании в почву сорбируется на органических и неорганических почвенных коллоидах, что уменьшает биодоступность данных органических соединений в качестве субстратов для микроорганизмов. Накопление ПАУ в почвенной среде ухудшает ее биологические параметры, такие как ферментативная активность и количество почвенных микроорганизмов [24-27]. Так, активность почвенной уреазы не представляет полной информации обо всех метаболических процессах, однако тесно связана с содержанием углерода, общего и аммиачного азота [28, 29]. Уровни органического углерода имеют особое значение. Добавление в почву органического вещества снижает неблагоприятное воздействие ПАУ на активность уреазы и влияние органического вещества на биохимические свойства почвы, что определяется видом и концентрацией ПАУ [30].

Настоящее исследование направлено на исследование биологической активности чернозема обыкновенного при загрязнении БаП в модельном эксперименте на основе особенностей накопления, фитотоксичности и деградации БаП, а также изучения изменений ферментативной активности в почве в уникальных условиях модельного эксперимента с искусственным загрязнением БаП. Содержание БаП в почве и растениях модельного эксперимента определяли с использованием нового экологически чистого метода субкритической водной экстракции, использованной вместо традиционных методов экстракции БаП с использованием высокого количества органических растворителей.

Материалы и методы

Исследования проводились с образцом почвы, собранным из верхнего (0–20 см) слоя карбонатного тяжелосуглинистого чернозема на территории Государственного почвенного заповедника «Персиановская заповедная степь», расположенного в Ростовской области (к югу от Российской Федерации), вдали от источников загрязнения. Данная почва имела следующие физико-химические характеристики: $C_{org} = 3,4 \%$, рН = 7,3, емкость катионного обмена (ЕКО) = 37,1 ммоль (+)100 г⁻¹; содержание CaCO₃ = 0,1 %, содержание физической глины = 53,1 % [31].

Модельные эксперименты были заложены в 2011 г. и проводились в естественных условиях. Два килограмма воздушно-сухой почвы просеивали через сито диаметром 1 мм и помещали в вегетативные горшки объемом 4 литра. Раствор БаП в ацетонитриле смешивали с почвой для получения конечных концентраций БаП в образцах, равных 20, 200, 400 и 800 мкг БаП на кг почвы (сухой вес), что соответствовало 1, 10, 20 и 40 уровням предельно-допустимых концентраций (ПДК), соответственно. Чистую почву использовали в качестве контроля. В качестве фона использовали почву, на поверхность которой вносили ацетонитрил – растворитель БаП. Каждый образец почвы отбирали в трехкратной повторности.

Выбор концентраций БаП в образцах почвы модельного эксперимента был обоснован уровнями содержания БаП в почвах, расположенных в окрестностях техногенных источников, таких как крупные электростанции, производящих энергию с использованием низкокачественного угля [32]. Исследования механизмов воздействия различных концентраций БаП на почву важны для понимания основных особенностей накопления, миграции и трансформации БаП в техногенно загрязненных почвах [33, 34].

Сосуды с почвой, загрязненной БаП, инкубировали в условиях, близких к естественным, на экспериментальной площадке Южного федерального университета, в течение 4,5 лет (56 месяцев). Для соблюдения естественных микробиологических процессов почву в сосудах увлажняли дистиллированной водой для поддержания оптимальной влажности. Каждую весну (через 8, 20, 32 и 44 месяца после начала инкубации) образцы почвы были засеяны яровым ячменем (Hordeum sativum distichum) «Одесский-100» (30 семян на сосуд). Перед засевом ячменя образцы почвы в вегетационных сосудах смешивали и отбирали для определения концентрации БаП. Через 4 месяца растения ячменя извлекали из сосудов с почвой, очищали от частиц почвы, измеряли морфометрические показатели, высушивали на воздухе, взвешивали, сушили, просеивали через сито диаметром 1 мм и анализировали содержание БаП. В данной статье представлены результаты исследований содержания БаП в почве и растениях через 4,5 года с момента закладки модельного опыта. Данный срок позволил рассмотреть состояние БаП в почве и его биодоступность после многолетней инактивации поллютанта в условиях модельного опыта.

Экстракция БаП субкритической водой. Экстракция БаП методом субкритической водной экстракции была использована для извлечения поллютанта из образцов почв и растений [35, 36]. Субкритическая водная экстракция БаП из образцов грунта проводилась в специально разработанном экстракционном картридже из нержавеющей стали и снабжена навинчивающимися колпачками на обоих концах экстракционного картриджа. Экстракционный картридж, содержащий образец и воду, помещали в печь, оборудованную регулятором температуры и давления [37, 38].

Анализ проб почвы и растений. Процесс анализа БаП в почвах на основе субкритической водной экстракции состоял из следующих поэтапных операций: воздушно-сухой образец почвы или растения измельчали в фарфоровой ступке и пропускали через сито 1 мм. Один грамм образца помещали в экстракционный картридж и добавляли 8 мл воды с двойной дистиллированной водой. Экстракцию проводили в оптимальных условиях (30 мин при 250 °С и 100 атм.). После охлаждения системы содержимое картриджа фильтровали в коническую стеклянную колбу и промывали 2 мл дистиллированной воды. Данную операцию повторяли два или три раза, пока фильтрат не становился прозрачным.

Была проведена жидкостная повторная экстракция БаП из водного экстракта, поскольку БаП нерастворим в воде [39]. Затем проводят концентрирование полученного экстракта, его очистку колоночной хроматографией и определение БаП с помощью высокоэффективного жидкостного хроматографа (ВЭЖХ) с использованием флуориметрического детектирования. Процесс встряхивания смеси микрообъема БаП, экстрагированного в органическую матрицу, позволил непосредственно эмульгировать определяемый токсикант в водный раствор [40, 41]. Количество органического растворителя (матрицы) было достаточно высоким для извлечения молекул БаП, но в то же время недостаточным для концентрирования примеси (при самой интенсивной люминесценции), что позволило получить четко отделенную структуру спектров при люминесценции детектора ВЭЖХ [42].

Водный раствор повторно экстрагировали три раза 5 мл н-гексана путем встряхивания в течение 15 мин в делительной воронке. Экстракты гексана объединяли и фильтровали через безводный Na₂SO₄, выпаривали досуха в грушевидной колбе на вакуумном испарителе на водяной бане при 40 °C. Остаток растворяли в 1 мл ацетонитрила, встряхивая в течение 30 мин.

Содержание БаП в экстрактах определяли количественно с помощью ВЭЖХ (Agilent 1260, Germany) с одновременным обнаружением ультрафиолетового света (UV-1000) и флуоресценции (FL-3000) согласно требованиям ISO 13877 [43]. Длина волны возбуждения (FD) составила 264 нм, длина волны излучения – 408 нм. Пик БаП на хроматограммах экстрактов образцов почвы, идентифицированных путем сравнения времени удерживания с аналитическим стандартным образцом, определяли с использованием двух детекторов.

Физические и химические свойства почвы определяли стандартными методами [44]. Растворители и реагенты включали этанол (96 %, аналитический класс), н-гексан (99 %, аналитический класс), гидрат калия (98 %, аналитический сорт), ацетонитрил (99,9 %, аналитический сорт), NaOH (97 %, аналитический класс) и безводный Na₂SO₄. Стандарт БаП в ацетонитриле (Sigma-Aldrich CAS Number 50–32–8) с концентрацией 200 мкг см⁻³ используется при подготовке стандартов для анализа ВЭЖХ.

Активность каталазы (H_2O_2 : H_2O_2 – оксидоредуктаза, КФ 1.11.1.6.) была определена газометрическим методом по А.Ш. Галстяну [45] по скорости разложения перекиси водорода (ГОСТ 177–88) при контакте с почвой. Активность выражали в мл $O_2 1^{-1}$ г 1 мин⁻¹. Активность дегидрогеназы (субстрат: НАД (Ф) – оксидоредуктазы, КФ 1.1.1) определяли инкубированием в термостате в анаэробных условиях 2,3,5 трифенилтетразолия хлористого с использованием раствора глюкозы в качестве источника дегидрирования. Содержание в образцах почв трифенилформазанов (ТФФ) определяли после экстрагирования спиртом спектрофотометрически при длине волны 540 нм в кюветах 10 мм. Активность выражали в мг ТФФ 10⁻¹ г 24 часа⁻¹.

Морфометрические показатели ярового ячменя изучались по методике В.В. Церлинга [46] в фазу полной спелости. Определялись: энергия прорастания, вес растения, высота растений, высота колоса с остями и без остей, высота побегов, длина корней.

Обработка данных и статистический анализ проводили с использованием STATISTICA 11.0.

Результаты и их обсуждение

Содержание бенз[а]пирена. Модельное загрязнение черноземов обыкновенных различными концентрациями БаП привело к ускоренной деструкции поллютанта в изученной почве в течение 4-х лет проведения модельного эксперимента. Основным фактором аккумуляции БаП в почвах и растениях модельного эксперимента была доза инокуляции токсиканта, которая способствовала сорбции ароматических молекул БаП, при удерживании на алюмосиликатной молекулярной решетке почв, что повлияло на прочность сорбции и биодоступность свободных БаП для растений. Поскольку фоновый уровень БаП в черноземе обыкновенном составил почти 1 ПДК, добавление 20 мкг кг⁻¹ БаП способствовало накоплению 37,4 мкг кг⁻¹ в первоначально загрязненной почве в первый год исследований (рис. 1).

Ранее было показано, что содержание БаП в почве, корнях и побегах ячменя в течение 4-х лет проведения исследования снижается [47]. Установлено, что концентрация БаП в загрязненной почве увеличивается прямо пропорционально уровню искусственного загрязнения БаП исходной почвы и составляет от 37,4 мкг кг⁻¹ в варианте 1 ПДК, 221,7 мкг кг⁻¹ в варианте 10 ПДК, 406,0 мкг кг⁻¹ в варианте 20 ПДК, 743,4 мкг кг⁻¹ в варианте 40 ПДК. В первоначально загрязненных почвах обнаруживали от 84 % (1 ПДК загрязненной почвы) до 99 % (10 ПДК) от общей внесенной концентрации БаП в почву.



Рис. 1. Содержание бенз [a] пирена в корнях и побегах ячменя и почве, мкг·кг⁻¹



Важной причиной деградации БаП в почве является воздействие корневых экссудатов растений, стимулирующих ферментную систему, способствующую деструкции БаП. Среди зерновых культур выделяют ячмень яровой как одну из наиболее информативных и чувствительных сельскохозяйственных культур при биодиагностике, способствующих деструкции БаП в почве [8]. Это подтверждается проведенными модельными исследованиями. Например, для варианта с максимальным загрязнением БаП – 40 ПДК, установлено повышение содержания БаП в корнях растений до 23,4 мкг кг⁻¹ в первый год исследования, что составило более 3 % от содержания БаП в почве, а в варианте 1 ПДК в первый год исследования содержание БаП в корнях растений достигало 6,4 % от содержания БаП в почве. Таким образом, показано, что корневое поглощение БаП максимально в наименее загрязненных почвах и минимально при высоких концентрациях вносимого БаП в почву. Аналогичные тенденции были обнаружены при поглощении БаП растениями [48]. Уровень содержания БаП в вегетативной части растения достигал 1-4 %, что значительно уступало содержанию БаП в корневой части растений. Полученные данные могут быть использованы для биоиндикации загрязненных почв и биоремедиации БаП.

Изменение морфометрических характеристик ярового ячменя. В качестве наиболее чувствительных биоиндикационных характеристик при загрязнении БаП может быть выделена морфометрия ярового ячменя, которую определяли в период максимального вегетативного развития растений. Было обнаружено влияние загрязнения почвы БаП на общую длину ярового ячменя, начиная с уровня загрязнения 1 ПДК (20 мкг кг⁻¹ БаП). Воздействие БаП на морфометрию растений при загрязнении различными дозами БаП показало высокий уровень корреляции между концентрацией БаП в почве и длиной ячменя, R²=0,98 (рис. 2, 3). Это подтверждает высокое фитотоксическое воздействие БаП на растения ячменя ярового: чем выше содержание БаП в почве, тем меньше длина растений ячменя ярового. Общая длина растений ячменя ярового за 4 года исследований коррелировала с содержанием БаП в почве. Для варианта 1 ПДК общая длина ячменя ярового достигла значений контрольного варианта через 4 года проведения модельного эксперимента [47]. Однако для вариантов, загрязненных в концентрациях 10, 20, 40 ПДК, общая длина ячменя ярового так и не достигла значений контрольного варианта, что свидетельствует о продолжающемся фитотоксическом воздействии БаП в данных вариантах даже после 4-х лет деструкции токсиканта. Вероятно, в ходе деградации БаП также образуются окисленные формы высокотоксичных метаболитов БаП, которые обуславливают продолжительный фитотоксический эффект для растений.

Установленное уменьшение суммарной высоты растений ячменя обусловлено снижением высоты

остей, постепенно снижающейся с увеличением содержания БаП в почве и растениях. Измерения длины корней также показали прямую зависимость от уровня загрязнения почв БаП: при увеличении концентрации БаП установлено незначительное увеличение длины корней. Это может быть вызвано высокой канцерогенностью и мутагенностью БаП, а также образующихся в ходе деградации БаП других представителей ПАУ и их канцерогенных метаболитов. Так, в исследовании H.A. Hernández-Ortega et al. [49] корни 10-дневных сеянцев Medicago sativa потеряли тонус сосудистой системы за счет роста сосудов метаксилемы при загрязнении дизельным топливом [50], что свидетельствует о возможном мутагенном эффекте на корневую систему растений при загрязнении ПАУ.



Рис. 2. Изменение высоты колоса с остями и без остей ячменя в зависимости от содержания бенз[а]пирена в почве, см

Fig. 2. Change in ear height with or without awn of barley, depending on benzo[a]pyrene content in soil, cm



симости от содержания бенз[а]пирена в почве, см Fig. 3. Change in shoot height and root length of barley, depending

Fig. 3. Change in shoot neight and root length of oarley, depending on benzo[a]pyrene content in soil, cm

Установлено снижение энергии прорастания ячменя ярового [31] при увеличении концентрации БаП в почве (рис. 4). На 4-й год проведения модельного эксперимента энергия прорастания увеличилась, что может быть связано со снижением уровня БаП в изученных почвах.

Общая масса растений ячменя имела обратную корреляционную зависимость с уровнем загрязнения почв БаП. Показано, что общая масса ячменя уменьшается с увеличением концентрации БаП (рис. 5).



Рис. 4. Изменение энергии прорастания ячменя при различных концентрациях бенз[а]пирена, %

Fig. 4. Change in barley germination energy for various concentrations of benzo[a]pyrene, %



Рис. 5. Изменение массы ячменя в зависимости от содержания бенз[а]пирена в почве, г

Fig. 5. Change in barley phytomass depending on benz[a]pyrene content in soil, g

Таким образом, при анализе морфобиометрических характеристик ячменя ярового, выращенного на почвах, искусственно загрязненных БаП, показано снижение массы растений с увеличением содержания БаП в почве (от 1 до 40 ПДК), что связано со снижением высоты побегов и колоса с остями на 38 и 26 %, соответственно. Однако показано увеличение длины корней на 16 % при 20 и 40 ПДК по сравнению с контролем, что может быть обусловлено усиленным делением клеток камбия корневой системы ячменя и, как следствие, утончением корня за счет увеличения его длины. Функциональные способности корня в случае подобной стимуляции вызывают усиление сорбции БаП за счет увеличения площади всасывания корневых волосков. Показатель интенсивности начального роста – энергия прорастания – демонстрирует снижение всхожести семян ячменя до 60 % в максимально загрязненном варианте по сравнению с контролем. Подобные процессы могут быть связаны с нарушением функций антиоксидантных ферментов растений, вызванные токсическим эффектом влияния БаП. В работе F. Bernard с соавторами [51] показано на примере брокколи (Brassica oleracea) и клевера белого (Trifolium repens), что именно биохимический уровень сопротивления окислительному стрессу (Reactive Oxygen Species) имеет наибольшее влияние на степень нарушения морфологической структуры растения [49].

Ферментативная активность. Полициклические ароматические углеводороды как любые химические загрязнители оказывают воздействие на окислительные и восстановительные процессы в почвах [51-54]. Однако, учитывая специфическое биологическое действие БаП на биологическое состояние почв, следует изучить информативность использования активности таких оксидоредуктаз, как каталаза и дегидрогеназа. Поскольку БаП – это органическое соединение, содержащее углерод, с молекулярной массой 252,31 г моль-1, и может служить источником углерода для ферментных систем, активность дегидрогеназы, как экзофермента, является информативным биологическим показателем загрязнения почвы БаП. С увеличением содержания БаП в почве до 10 ПДК существенных изменений в активности дегирогеназ замечено не было, что обусловлено повышением содержания ризосферных выделений растений, стимулирующих ферментативную деятельность дегидрогеназ, а также ростом активности ферментов за счет использования БаП в качестве источника углерода при невысоком содержании БаП в почве [35]. Однако при концентрации 20 и 40 ПДК БаП установлено значительное ингибирование активности дегидрогеназ по сравнению с контролем (рис. 6).

Установлено снижение активности каталазы при увеличении содержания БаП в почвах модельного эксперимента. Установлено снижение активности каталазы по сравнению с контрольным вариантом для всех загрязненных почв БаП для вариантов 1, 10, 20 и 40 ПДК: на 1, 17,5, 28,0 и 47,3 %, соответственно.

Корреляционная зависимость. Составлена корреляционная матрица между содержанием БаП в корнях, побегах, почве модельного эксперимента и весом растений, энергией прорастания семян ячменя, высотой колоса без остей, высотой колоса с остями, высотой побегов и длиной корней, в которой отмечена очень тесная отрицательная связь между содержанием БаП в корнях, побегах и почве и энергией прорастания семян, весом растений, высотой колоса с остями и без остей, высотой побегов (R=-0,82-0,99), а также тесная и очень тесная положительная связь между содержанием БаП в корнях, побегах и почве и длиной корневой системы растений ячменя (R=0,75-0,85) (табл. 1). Содержание БаП в почве имело прямую корреляционную зависимость с содержанием БаП в побегах и корнях ячменя (R=0,89-0,98). Подобные зависимости отражают процессы биоаккумуляции БаП растениями, описанные в ряде работ [55-57].



Активность дегидрогеназ Активность каталазы

Рис. 6. Изменение активности дегидрогеназ и каталазы почв в зависимости от содержания бенз[а]пирена в почве, % от контроля

Fig. 6. Changes in activity of dehydrohenases and catalase of soils depending on benzo[a]pyrene content in soil, % of control

При сравнении связей между ферментативной активностью почв и содержанием БаП в почве, побегах и корнях установлено снижение активности дегидрогеназ при повышении содержания БаП в корнях растений (R=-0,83), вегетативной части растений (R=-0,92), почве (R=-0,91) (табл. 2). Показана тенденция к снижению активности окислительно-восстановительного фермента – каталазы, при повышении содержания БаП в почве.

 Таблица 1.
 Корреляционная матрица между содержанием бенз[а]пирена в почве и морфометрическими показателями ячменя

 Table 1.
 Correlation matrix between benz[a]purene content in soil and morphometric parameters of barley

Морфометрические показатели								Содержание БаП	
Morphometric parameters							BaP content		
Вес растений	Энергия прорастания	Высота колоса без остей	Высота колоса с остями	Высота побегов	Длина корней	Корни	Побеги	Почва	
Plant weight	Germination energy	Ear height	Ear height with awns	Shoot height	Root length	Roots	Shoots	Soil	
1,00									
0,99	1,00								
0,93	0,94	1,00							
0,98	0,99	0,97	1,00						
0,99	1,00	0,93	0,99	1,00					
-0,82	-0,83	-0,65	-0,77	-0,79	1,00				
-0,94	-0,96	-0,85	-0,95	-0,97	0,75	1,00			
-0,97	-0,99	-0,93	-0,99	-0,99	0,85	0,96	1,00		
-0,94	-0,96	-0,95	-0,97	-0,95	0,78	0,89	0,98	1,00	

Примечание. Расчет проводили по абсолютным показателям: вес растений (г), энергия прорастания (%), высота колоса без остей и с остями (см), высота побега и длина корней (см), содержание бенз[а]пирена в почве, побегах и корнях ячменя (мкг·кг⁻¹). Полужирным шрифтом выделены достоверные отличия.

Note. Calculation was carried out in absolute terms: weight of the plants (g), germination energy (%), ear height without sprouts and with awns (cm), shoot height and length of roots (cm), benz[a]pyrene content in soil, barley shoots and roots ($\mu g \cdot k g^{-1}$). Significant differences are in bold.

Таблица 2. Корреляционная матрица между содержанием бенз [а]пирена и ферментативной активностью почв

 Table 2.
 Correlation matrix between benz [a] pyrene content and enzymatic activity of soils

Ферментативна Enzymatic	я активность activity	C	одержание Ба BaP content	Π
дегидрогеназ dehydrogenases	каталаза catalase	корни roots	побеги shoots	почва soil
1,00				
0,66	1,00			
-0,83	-0,63	1,00		
-0,92	-0,58	0,95	1,00	
-0,91	-0,40	0,88	0,97	1,00

Примечание. Расчет проводили по абсолютным показателям: активность дегидрогеназ, мг $T\Phi\Phi\cdot10\ r^{-1}\cdot24\ vaca^{-1}$, активность каталазы мл $O_2\cdot1\ r^{-1}\cdot1$ мин⁻¹, содержание бензо[а]пирена в почве, побегах и корнях ячменя (мкг·кг⁻¹). Полужирным шрифтом выделены достоверные отличия.

Note. Calculation was carried out in absolute terms: dehydrogenases activity, mg TPP 10 g^{-1} ·24 hours⁻¹, catalase activity ml $O_2 1g^{-1}$ for 1 min⁻¹, benzo[a]pyrene content in soil, shoots and barley roots (μg ·k g^{-1}). Significant differences are in bold.

Заключение

Таким образом, проведена оценка влияния БаП на биологическую активность чернозема обыкновенного и морфометрические показатели ярового ячменя спустя 4 года после внесения поллютанта в почву модельного эксперимента с загрязнением различными дозами БаП с ежегодным высевом ячменя ярового. Установлено, что основным фактором накопления БаП в почвах и растениях модель-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Tsibart A., Gennadiev A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: Sources, behavior, and indication significance // Eurasian Soil Science. - 2013. - V. 46 (7). - P. 728-741.
- Jian Y. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list // Mutation Research. - 2004. - V. 557 - P. 99-108.
- Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union / T. Wenzl, R. Simon, J. Kleiner, E. Anklam // Trend Analytic Chemistry. - 2006. - V. 25 (7). - P. 716-725.
- Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures // Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon (FR): IARC, 2010. V. 92. 862 p.
- Lamichhane S., Krishna K.B., Sarukkalige R. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: a review // Chemosphere. – 2016. – V. 148. – P. 336–353.
- Antizar-Ladislao B., Lopez-Real J., Beck A. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an aged coal tar contaminated soil under in-vessel composting conditions // Environmental Pollution. – 2006. – V. 141 (3). – P. 459–468.
- Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soilplant systems of the northern-taiga biocenoses / E.V. Yakovleva, V.A. Beznosikov, B.M. Kondratenok, D.N. Gabov // Eurasian Soil Science. - 2012. - V. 45 (3). - P. 309-320.
- Biodegradation of Benzo(a)pyrene by biofilm forming and plant growth promoting Acinetobacter sp. strain PDB4 / R. Kotoky, S. Das, L.P. Singha, P. Pandey, K.M. Singha // Environmental Technology & Innovation. - 2017. - V. 10. - P. 256-268.

ного эксперимента была доза внесения токсиканта. Несмотря на длительный период инкубации БаП в почве наблюдается достаточно высокое содержание поллютанта в почвах и накопление его в растениях. Установлен длительный токсический эффект влияния поллютанта на условия прорастания ярового ячменя, что подтверждается снижением морфометрических показателей ярового ячменя по сравнению с контролем.

Активность дегидрогеназ и каталазы ингибируется с увеличением дозы бенз[а]пирена. Максимальное токсическое воздействие БаП оказал на активность дегидрогеназ при дозах 20 и 40 ПДК, что составило 83 и 93 %, относительно контроля. При анализе морфометрических характеристик ячменя ярового, выращенного на почвах, искусственно загрязненных БаП, показано снижение массы растений с увеличением содержания БаП в почве (от 1 до 40 ПДК), что связано со снижением высоты побегов и колоса с остями на 38 и 26 %, соответственно. Однако показано увеличение длины корней на 16 % при 20 и 40 ПДК по сравнению с контролем. Энергия прорастания показала снижение всхожести семян ячменя более чем 60~% в максимально загрязненном варианте по сравнению с контролем.

Исследование поддержано Министерством образования и науки РФ № 5.948.2017/ПЧ и грантами Президента РФ (НШ-3464.2018.11; МК-2973.2019.4). Исследования выполнены на оборудовании ЦКП Южного федерального университета «Высокие технологии», «Биотехнология, биомедицинский и экологический мониторинг».

- How the sorption of benzene in soils contaminated with aromatic hydrocarbons is affected by the presence of biofuels / M. Carvalho, M. Vila, F. Rohden, M. Rosas, J. Dias, T. Oliva-Teles, A. Danko, C. Delerue-Matos, A. Fiuza // Eurasian Journal Soil Science. - 2015. - V. 4 (2). - P. 111-117.
- Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A. The levels and composition of persistent organic pollutants in alluvial agriculture soils affected by flooding // Environmental Monitoring Assessment. – 2013. – V. 185 (12). – P. 9935–9948.
- Monitoring researches of the benzo[a]pyrene content in soils under the influence of the technogenic zone / T. Minkina, S. Sushkova, S. Mandzhieva, I. Tjurina, O. Filonova // Middle East Journal of Scientific Research. 2013. V. 17 (1). P. 44–49.
- 12. Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Environment Agency. Contaminants in soil: collation of toxicological data and intake values for humans. Benzo[a]pyrene. Technical report. Bristol: Bristol Environment Agency, 2002. 30 p.
- Пространственное варьирование содержания бенз (а) пирена и свойств агрозема вблизи Южно-сахалинской ТЭЦ / Д.Н. Липатов, А.И. Щеглов, Д.В. Манахов, Ю.А. Завгородняя, П.Т. Брехов // Почвоведение. – 2015. – № 5. – С. 633–641.
- Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soilplant systems of the northern-taiga biocenoses / E.V. Yakovleva, V.A. Beznosikov, B.M. Kondratenok, D.N. Gabov // Eurasian Soil Science. - 2012. - V. 45 (3). - P. 309-320.
- Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of technogenic landscapes / D. Gabov, V. Beznosikov, B. Kondratenok, E. Yakovleva // Geochemical International. – 2010. – V. 48 (6). – P. 569–579.
- Gennadiev A., Tsibart A. Pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of reserved and anthropogenically modified areas:

Factors and features of accumulation // Eurasian Soil Science. – 2013. – V. 46 (1). – P. 28–36.

- Aranda R., Martinez-Pagán P. Methodology for the detection of contamination by hydrocarbons and further soil sampling for volatile and semi-volatile organic enrichment in former petrol stations, SE Spain // Eurasian Soil Science. - 2012. - V. 1 (1). -P. 10-15.
- Anthracene and benzo (a) pyrene degradation in soil is favoured by compost amendment: Perspectives for a bioremediation approach / D. Baldantonia, R. Morellia, A. Bellinoa, M. Vittoria Prati, A. Alfania, F. de Nicolac // Journal of Hazardous Materials. – 2017. – V. 339. – P. 395–400.
- Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions / H. Hamdi, S. Benzarti, L. Manusad^{*}zianas, I. Aoyama, N. Jedidi // Soil Biology and Biochemistry. - 2007. - V. 39. - P. 1926-1935.
- Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes / P. Hinsinger, G.R. Gobran, P.J. Gregory, W.W. Wenzel // New Phytology. - 2005. -V. 168 (2). - P. 293-303.
- Variation in root traits associated with nutrient foraging among temperate pasture legumes and grasses / Z. Yang, R. Culvenor, R. Haling, A. Stefanski, M. Ryan, G. Sandral, D. Kidd, H. Lambers, R. Simpson // Grass Forage Science. - 2015. - V. 72. - P. 93-103.
- 22. Growth and root dry matter allocation by pasture legumes and a grasswith contrasting external critical phosphorus requirements / R.E. Haling, Z. Yang, N. Shadwell, R.A. Culvenor, A. Stefanski, M.H. Ryan, G.A. Sandral, D.R. Kidd, H., Lambers R.J. Simpson // Plant Soil. 2016. V. 407 (1-2). P. 67-79.
- Bisht S. Bioremediation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) using rhizosphere technology // Brazilian Journal Microbiology. - 2015. - V. 46 (1). - P. 7-21.
- Wyszkowska J., Wyszkowski M. Influence of petroleum derived substances on number of oligotrophic and copitrophic bacteria in soil // American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. 2008. V. 2 (2). P. 172–179.
- Interactive effect of dissolved organic matter and phenanthrene on soil enzymatic activities / X. Zhan, W. Wu, L. Zhou, J. Liang, T. Jiang // Journal Environmental Science. – 2010. – V. 22 (4). – P. 607–614.
- Influence of xenobiotic contaminants on landfill soil microbial activity and diversity / M.I. Perez-Leblic, A. Turmero, M. Hernandez, A.J. Hernandez, J. Pastor, A.S. Ball, J. Rodriguez, M.E. Arias // Journal Environmental Management. 2010. V. 30 (1). P. 285-290.
- Hawrot-Paw M., Martynus M. The influence of diesel fuel and biodiesel on soil microbial biomass // Polish Journal of Environmental Studies. – 2011. – V. 2 (20). – P. 497–501.
- Bielińska E.J., Żukowska G. Activity of protease and urease in light soil fertilized with sewage sludge // Agrophysica. - 2002. -V. 70. - P. 41-47.
- Wyszkowska J., Wyszkowski M. Activity of soil dehydrogenases, urease and acid and alkaline phosphatases in soil polluted with petroleum // Journal of Toxicology and Environmental Health. – 2010. – V. 73. – P. 1202–1210.
- Application of different organic amendments in a gasoline contaminated soil: Effect on soil microbial properties / M. Tejada, J.L. Gonzalez, M.T. Hernandez, C. Garcia // Bioresource Technology. – 2008. – V. 99. – P. 2872–2880.
- ГОСТ 17.4.1.02.-83. Сохранение. Почвы. Классификация химических веществ для борьбы с загрязнением. – М.: ИД «Стандарт», 2008. – 8 с.
- 32. Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink / A.A. Batukaev, A.P. Endovitsky, A.G. Andreev, V.P. Kalinichenko, T.M. Minkina, Z.S. Dikaev, S.S. Mandzhieva, S.N. Sushkova // Solid Earth. - 2016. - V. 7 (2). - P. 415-423.

- 33. Effect of an Attendant Anion on the Balance of Cations in the Soil-Solution System with an Ordinary Chernozem as an Example / T. Minkina, D. Pinsky, S. Mandzhieva, T. Bauer, S. Sushkova, A. Kushnareva // Eurasian Soil Science. - 2014. - V. 47 (8). -P. 772-780.
- Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils under the effect of long-term technogenic poluttion / S. Sushkova, T. Minkina, I. Turina, S. Mandzhieva, T. Bauer, R. Kizilkaya, I. Zamulina // Journal Geochemical Exploration. – 2017. – V. 174. – P. 100–106.
- New method for benzo[a]pyrene analysis in plant material using subcritical water extraction / S. Sushkova, G. Vasilyeva, T. Minkina, S. Mandzhieva, I. Tjurina, S. Kolesnikov, R. Kizilkaya, T. Askin // Journal Geochemical Exploration. – 2014. – V. 144 (P. B). – P. 267–272.
- 36. New alternative method of benzo[a]pyrene extractionfrom soils and its approbation in soil under technogenic pressure / S.N. Sushkova, T.M. Minkina, S.S. Mandzhieva, G.K. Vasilyeva, N.I. Borisenko, I.G. Turina, R. Kızılkaya // Journal of Soils and Sediments. - 2016. - V. 16 (4). - P. 1323-1329.
- Extraction of quercetin from Polygonum hydropiper L. by subcritical water. American / A. Lekar, S. Borisenko, E. Vetrova, S. Sushkova, N. Borisenko // Journal of Agricultural and Biological Science. - 2013 - V. 9 (1). - P. 1-5.
- Approbation of express-method for benzo [a] pyrene extraction from soils in the technogenic emission zone territories / S. Sushkova, T. Minkina, S. Mandzhieva, N. Borisenko, G. Vasilyeva, R. Kızılkaya, T. Aıkın // Eurasian Journal Soil Science. – 2015. – V. 4 (1). – P. 15–21.
- Dadkhah A., Akgerman A. Hot water extraction with in situ wet oxidation: Kinetics of PAHs removal from soil // Journal Hazard Materials. - 2006. - V. 137 (1). - P. 518-526.
- Pilot-scale subcritical water remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon- and pesticide-contaminated soil / A. Lagadec, D. Miller, A. Lilke, S. Hawthorne // Environ Science Technology. - 2000. - V. 34 (8). - P. 1542-1548.
- Latawiec A., Reid B. Sequential extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons using subcritical water // Chemosphere. - 2010. -V. 78 (8). - P. 1042-1048.
- 42. Galkin A., Lunin V. Water in sub- and supercritical conditions is a univer-salfluid for implementation of chemicalreactions // Success Chem. – 2005. – V. 74 (1). – P. 24–40.
- ISO 13877-2005. Soil quality Determination of polynuclear aromatic hydrocarbons. Method using high -performance liquid chromatography. - 2005. - 15 p.
- 44. Агрохимические методы исследования почв / под ред. А.В. Соколова. – М.: Наука, 1975. – 656 с.
- 45. Галстян А.Ш. Ферментативная активность почв Армении. Ереван: Айастан, 1974. – 275 с.
- Церлинг В.В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур. Справочник. – М.: Агропромиздат, 1990. – 236 с.
- Influence of PAH contamination on soil ecological status / S.N. Sushkova, T. Minkina, I. Deryabkina (Turina), S. Mandzhieva, I. Zamulina, T. Bauer, G. Vasilyeva, E. Antonenko, V. Rajput // Journal of Soils and Sediments. - 2018. - V. 18 (6). -P. 2368-2378.
- 48. Мониторинг содержания бенз (а) пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения / С.Н. Сушкова, Т.М. Минкина, С.С. Манджиева, И.Г. Тюрина, Г.К. Васильева, Р. Кизилкая // Почвоведение. – 2017. – V. 1. – С. 105–116.
- 49. Diesel effects on root hydraulic conductivity and morphological changes of the vascular cylinder in Medicago sativa / H.A. Hernández-Ortega, P.A. Quintanar-Isaías, A.T. Jaramillo-Pérez, A. Alarcón, R. Ferrera-Cerrato, R. Lazzarini-Lechuga // Environmental and Experimental Botany. - 2014. - V. 105. -P. 1-9.
- 50. Accumulation of PAHs in tundra plants and soils under the influence of coal mining / E.V. Yakovleva, D.N. Gabov, V.A. Beznosi-

kov, B.M. Kondratenok, Y.A. Dubrovskiy // Journal Polycyclic Aromatic Compounds. – 2016. – V. 37 (2–3). – P. 1–18.

- Antioxidant responses of Annelids, Brassicaceae and Fabaceae to pollutants: a review / F. Bernard, F. Brulle, S. Dumez, S. Lemiere, A. Platel, F. Nesslany, D. Cuny, A. Deram, F. Vandenbulcke // Ecotoxicology and Environmental Safety. - 2015. - V. 114. -P. 273-303.
- 52. Влияние загрязнения нефтью и нефтепродуктами на биологическое состояние чернозема обыкновенного / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, М.Л. Татосян, В.Ф. Вальков // Почвоведение. 2006. № 5. С. 616–620.
- 53. Assessing the effect of heavy metals from the Novocherkassk power station emissions on the biological activity of soils in the adjacent areas / T.V. Minnikova, T.V. Denisova, S.S. Mandzhieva, S.I. Kolesnikov, T.M. Minkina, V.A. Chaplygin, M.V. Burachevskaya, S.N. Sushkova, T.V. Bauer // Journal of Geochemical Exploration. - 2017. - V. 174. - P. 70-78.
- 54. Оценка агроэкологических показателей нефтезагрязненного чернозема Ростовской области при ремедиации мочевиной и гуматом калия / Т.В. Минникова, Т.В. Денисова, С.И. Колесников, Ю.В. Акименко // Российская сельскохозяйственная наука. – 2018. – № 1. – С. 44–48.
- 55. Трифонова Т.А., Забелина О.Н. Изменение биологической активности почвы городских рекреационных территорий в условиях загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами // Почвоведение. 2017. № 4. С. 497–505.
- Orecchio S. Contamination from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of a botanic garden localized next to a former manufacturing gas plant in Palermo (Italy) // Journal of Hazardous Materials. - 2010. - V. 180. - P. 590-601.
- Effects of root exudates on gel-beads/reeds combination remediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons / W. Tian, J. Zhao, Y. Zhou, K. Qiao, X. Jin, Q. Liu // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2017. V. 135. P. 158-164.

Поступила: 08.11.2018 г.

Информация об авторах

Минникова Т.В., кандидат биологических наук, младший научный сотрудник кафедры экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета.

Сушкова С.Н., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета.

Манджиева С.С., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета.

Минкина Т.М., доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета.

Колесников С.И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета. UDC 631.422; 631.465

ESTIMATION OF THE BENZO[A]PYRENE EFFECT ON BIOLOGICAL ACTIVITY OF ROSTOV REGION CHERNOZEM

Tatiana V. Minnikova¹, loko261008@yandex.ru

Svetlana N. Sushkova¹,

terra rossa@mail.ru

Saglara S. Mandzhieva¹,

msaglara@mail.ru

Tatiana M. Minkina¹,

tminkina@mail.ru

Sergey I. Kolesnikov¹,

kolesnikov@sfedu.ru

Southern Federal University,
 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

The relevance of the research is caused by the importance in assessing the effect of long-term polycyclic aromatic hydrocarbons contamination using spring barley (Hordeum sativum distichum) on enzymatic activity of chernozems and the morphometric parameters of barley. Spring barley was used to assess the negative impact of chernozem soil pollution with benzo[a]pyrene as a well-known carcinogen and a mutagen among polycyclic aromatic hydrocarbons. The selected doses were close to the level of technogenic pressure in the studied zone: $0-800 \mu g$ benzo[a]pyrene kg⁻¹. Benzo[a]pyrene content in soils during 4 years of the experiment affected the morphometric parameters of barley and the absorption of benzo[a]pyrene by plants, as well as the enzymatic activity of soils.

The main aim was to assess benzo[a]pyrene effect on the chernozem biological activity in the Rostov Region.

Objects. The investigations were carried out with a sample of soil taken from the upper (0–20 cm) layer of carbonate heavy loamy chernozem on the territory of the State Soil Preserve «Persian Protected Steppe» located in the Rostov Region (south of the Russian Federation), far from pollution sources. This soil has the following characteristics: $C_{organic} - 3,4\%$, pH – 7,3, exchange capacity cation – 37,1 mmol (+)/100 g⁻¹; the content of CaCO₃ is 0,1\%, the content of physical clay is 53,1\%.

Methods. Model experiments were carried out under the natural conditions. Two kilograms of air-dry soil were sieved through a 1-mmdiameter sieve and placed into the 4 liters vegetative pots. The benzo[a]pyrene solution in acetonitrile was mixed with the soil to obtain final concentrations of benzo[a]pyrene in soil samples of 20, 200, 400 and 800 μ g benzo[a]pyrene kg⁻¹ (dry weight), which corresponds to 1, 10, 20 and 40 levels of maximum permissible concentration of benzo[a]pyrene. Clean soil was used as a control and, in addition, a background control was performed where acetonitrile was added similarly to the samples with benzo[a]pyrene.

Results. The main factor influencing the increase in benzo[a]pyrene in soil and plants of model experiment was inoculation dose of toxicant in chernozem ordinary. The activity of oxidoreductase (catalase and dehydrogenases) of chernozem was inhibited with increasing benzo[a]pyrene content in the soil. The greatest toxic effect of benzo[a]pyrene was observed on the activity of dehydrogenases. Tendencies of pronounced phytotoxicity of soils were observed for all morphometric characteristics of spring barley, such as germination energy, length of shoots, plant weight and length of ears. The quantitative absorption levels of benzo[a]pyrene by the roots of spring barley exceeded the vegetative part by more than 2,5 times in all contaminated variants. Thus, the migration of benzo[a]pyrene to shoots and roots of spring barley from chernozem, accompanied by inhibition activity of dehydrogenases and catalase demonstrated the possibility of evaluating bioindication reactions during environmental monitoring to assess the effect of benzo[a]pyrene contamination.

Key words:

Benzo[a]pyrene, soil, spring barley, morphometry, catalase activity, dehydrogenases activity, correlative dependence.

The research was supported by the projects of Ministry of Education and Science of the RF (no. 5.948.2017/PCh) and by the grant of the President of the Russian Federation (NSH-3464.2018.11; MK-2973.2019.4). The research was carried out using the equipment of the Centre for Collective Use of South Federal University «Biotechnologies, biomedical and ecological monitoring».

REFERENCES

- Tsibart A., Gennadiev A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: Sources, behavior, and indication significance. *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46 (7), pp. 728–741.
- Jian Y. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutation Research*, 2004, vol. 557, pp. 99–108.
- 3. Wenzl T., Simon R., Kleiner J., Anklam E. Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the en-

vironment needed for new food legislation in the European Union. *Trend Analytic Chemistry*, 2006, vol. 25 (7), pp. 716–725.

- 4. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon (FR), IARC, 2010. Vol. 92, 862 p.
- Lamichhane S., Krishna K.B., Sarukkalige R. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: a review. *Che*mosphere, 2016, vol. 148, pp. 336–353.
- 6. Antizar-Ladislao B., Lopez-Real J., Beck A. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an aged coal tar contami-

nated soil under in-vessel composting conditions. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 141 (3), pp. 459–468.

- Yakovleva E.V., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Gabov D.N. Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil-plant systems of the northern-taiga biocenoses. *Eura*sian Soil Science, 2012, vol. 45 (3), pp. 309-320.
- Kotoky R., Das S., Singha L.P., Pandey P., Singha K.M. Biodegradation of Benzo(a)pyrene by biofilm forming and plant growth promoting Acinetobacter sp. strain PDB4. *Environmental Technology & Innovation*, 2017, vol.10, pp. 256–268.
- Carvalho M., Vila M., Rohden F., Rosas M., Dias J., Oliva-Teles T., Danko A., Delerue-Matos C., Fiuza A. How the sorption of benzene in soils contaminated with aromatic hydrocarbons is affected by the presence of biofuels. *Eurasian Journal Soil Science*, 2015, vol. 4 (2), pp. 111–117.
- Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A. The levels and composition of persistent organic pollutants in alluvial agriculture soils affected by flooding. *Environmental Monitoring Assessment*, 2013, vol. 185 (12), pp. 9935–9948.
- Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Tjurina I., Filonova O. Monitoring researches of the benzo [a] pyrene content in soils under the influence of the technogenic zone. *Middle East Journal of Scientific Research*, 2013, vol. 17 (1), pp. 44–49.
- 12. Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Environment Agency. Contaminants in soil: Collation of toxicological data and intake values for humans. Benzo[a]pyrene. Technical report. Bristol, Bristol Environment Agency, 2002. 30 p.
- Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V., Zavgorodnyaya Yu.A., Brekhov P.T. Spatial variation of benzo[a]pyrene and agrozem properties in the vicinity of the Yuzhno-Sakhalinsk thermal power plant. *Eurasian Soil Science*, 2015. vol. 48, no. 5, pp. 547–554. In Rus.
- Yakovleva E.V., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Gabov D.N. Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil-plant systems of the northern-taiga biocenoses. *Eura*sian Soil Science, 2012, vol. 45 (3), pp. 309–320.
- Gabov D., Beznosikov V., Kondratenok B., Yakovleva E. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of technogenic landscapes. *Geochemical International*, 2010, vol. 48 (6), pp. 569–579.
- Gennadiev A., Tsibart A. Pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of reserved and anthropogenically modified areas: Factors and features of accumulation. *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46 (1), pp. 28-36.
- Aranda R., Martinez-Pagán P. Methodology for the detection of contamination by hydrocarbons and further soil sampling for volatile and semi-volatile organic enrichment in former petrol stations, SE Spain. *Eurasian Soil Science*, 2012, vol. 1 (1), pp. 10–15.
- Baldantonia D., Morellia R., Bellinoa A., Vittoria Prati M., Alfania A., De Nicolac F. Anthracene and benzo(a)pyrene degradation in soil is favoured by compost amendment: Perspectives for a bioremediation approach. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, vol. 339, pp. 395–400.
- Hamdi H., Benzarti S., Manusad'zianas L., Aoyama I., Jedidi N. Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, vol. 39, pp. 1926–1935.
- Hinsinger P., Gobran G.R., Gregory P.J., Wenzel W.W. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytology*, 2005, vol. 168 (2), pp. 293-303.
- Yang Z., Culvenor R., Haling R., Stefanski A., Ryan M., Sandral G., Kidd D., Lambers H., Simpson R. Variation in root traits associated with nutrient foraging among temperate pasture legumes and grasses. *Grass Forage Science*, 2015, vol. 72, pp. 93–103.
- 22. Haling R.E., Yang Z., Shadwell N., Culvenor R.A., Stefanski A., Ryan M.H., Sandral G.A., Kidd D.R., Lambers H., Simpson R.J. Growth and root dry matter allocation by pasture legumes and a

grass with contrasting external critical phosphorus requirements. *Plant Soil*, 2016, vol. 407 (1–2), pp. 67–79.

- Bisht S., Bioremediation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) using rhizosphere technology. *Brazilian Journal Microbiology*, 2015, vol. 46 (1), pp. 7–21.
- Wyszkowska J., Wyszkowski M. Influence of petroleum derived substances on number of oligotrophic and copitrophic bacteria in soil. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2008, vol. 2 (2), pp. 172–179.
- Zhan X., Wu W., Zhou L., Liang J., Jiang T. Interactive effect of dissolved organic matter and phenanthrene on soil enzymatic activities. *Journal Environmental Science*, 2010, vol. 22 (4), pp. 607.
- Perez-Leblic M.I., Turmero A., Hernandez M., Hernandez A.J., Pastor J., Ball A.S., Rodriguez J., Arias M.E. Influence of xenobiotic contaminants on landfill soil microbial activity and diversity. *Journal Environmental Management*, 2010, vol. 30 (1), pp. 285–290.
- Hawrot-Paw M., Martynus M. The influence of diesel fuel and biodiesel on soil microbial biomass. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2011, vol. 2 (20), pp. 497–501.
- Bielińska E.J., Żukowska G. Activity of protease and urease in light soil fertilized with sewage sludge. *Agrophysica*, 2002, vol. 70, pp. 41-47.
- Wyszkowska J., Wyszkowski M. Activity of soil dehydrogenases, urease and acid and alkaline phosphatases in soil polluted with petroleum. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2010, vol. 73, pp. 1202–1210.
- Tejada M., Gonzalez J.L., Hernandez M.T., Garcia C. Application of different organic amendments in a gasoline contaminated soil: effect on soil microbial properties. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 2872–2880.
- GOST 17.4.1.02.-83. Sokhranenie. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya borby s zagryazneniem [State Standard 17.4.1.02.-83. Preservation. Soil. Classification of chemicals to control pollution]. Moscow, Standard Publ. house, 2008. 8 p.
- 32. Batukaev A.A., Endovitsky A.P., Andreev A.G., Kalinichenko V.P., Minkina T.M., Dikaev Z.S., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N. Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink. *Solid Earth*, 2016, vol. 7 (2), pp. 415–423.
- Minkina T., Pinsky D., Mandzhieva S., Bauer T., Sushkova S., Kushnareva A. Effect of an Attendant Anion on the Balance of Cations in the Soil-Solution System with an Ordinary Chernozem as an Example. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47 (8), pp. 772-780.
- 34. Sushkova S., Minkina T., Turina I., Mandzhieva S., Bauer T., Kizilkaya R., Zamulina I. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils under the effect of long-term technogenic pollution. *Journal Geochemical Exploration*, 2017, vol. 174, pp. 100–106.
- 35. Sushkova S., Vasilyeva G., Minkina T., Mandzhieva S., Tyurina I., Kolesnikov S., Kizilkaya R., Askin T. New method for benzo[a]pyrene analysis in plant material using subcritical water extraction. *Journal Geochemical Exploration*, 2014, vol. 144 (P. B), pp. 267–272.
- 36. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Vasilyeva G.K., Borisenko N.I., Turina I.G., Kızılkaya R. New alternative method of benz[a]pyrene extractionfrom soils and its approbation in soil under technogenic pressure. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, vol. 16 (4), pp. 1323–1329.
- Lekar A., Borisenko S., Vetrova E., Sushkova S., Borisenko N. Extraction of quercetin from Polygonum hydropiper L. by subcritical water. American. *Journal of Agricultural and Biologi*cal Science, 2013, vol. 9 (1), pp. 1–5.
- Sushkova S., Minkina T., Mandzhieva S., Borisenko N., Vasilyeva G., Kızılkaya R., Aıkın T. Approbation of express-method for

benzo[a]pyrene extraction from soils in the technogenic emission zone territories. *Eurasian Journal Soil Science*, 2015, vol. 4 (1), pp. 15–21.

- Dadkhah A., Akgerman A. Hot water extraction with in situ wet oxidation: Kinetics of PAHs removal from soil. *Journal Hazard Materials*, 2006, vol. 137 (1), pp. 518–526.
- Lagadec A., Miller D., Lilke A., Hawthorne S. Pilot-scale subcritical water remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon- and pesticide-contaminated soil. *Environ Science Technology*, 2000, vol. 34(8), pp.1542-1548.
- Latawiec A., Reid B. Sequential extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons using subcritical water. *Chemosphere*, 2010, vol. 78 (8), pp. 1042-1048.
- Galkin A., Lunin V. Water in sub- and supercritical conditions is a univer-salfluid for implementation of chemicalreactions. *Success Chem.*, 2005, vol. 74 (1), pp. 24–40.
- ISO 13877–2005. Soil quality Determination of polynuclear aromatic hydrocarbons – Method using high-performance liquid chromatography. 2005. 15 p.
- 44. Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv [Agrochemical methods of soil research]. Ed. by A.V. Sokolov. Moscow, Nauka Publ., 1975. 656 p.
- Galstyan A.Sh. Fermentativnaya aktivnost pochv Armenii [Enzymatic activity of soils in Armenia]. Yerevan, Hayastan Publ., 1974. 275 p.
- Tserling V.V. Diagnostika pitaniya selskokhozyastvennykh kultur. Spravochnik [Diagnostics of crop nutrition. Directory]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 236 p.
- 47. Sushkova S.N., Minkina T., Deryabkina (Turina) I., Mandzhieva S., Zamulina I., Bauer T., Vasilyeva G., Antonenko E., Rajput V. Influence of PAH contamination on soil ecological status. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18 (6), pp. 2368–2378.
- 48. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Deryabkina I.G., Vasil'eva G.K., Kızılkaya R. Dynamics of benzo [α] pyrene accumulation in soils under the influence of aerotechnogenic emissions. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 1. pp. 95–105. In Rus.
- 49. Hernández-Ortega H.A., Quintanar-Isaías P.A., Jaramillo-Pérez A.T., Alarcón A., Ferrera- Cerrato R., Lazzarini-Lechuga R. Diesel effects on root hydraulic conductivity and morpholo-

gical changes of the vascular cylinder in Medicago sativa. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, vol. 105, pp. 1–9.

- Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Dubrovskiy Y.A. Accumulation of PAHs in tundra plants and soils under the influence of coal mining. *Journal Polycyclic Aromatic Compounds*, 2016, vol. 37 (2–3), pp. 1–18.
- Bernard F., Brulle F., Dumez S., Lemiere S., Platel A., Nesslany F., Cuny D., Deram A., Vandenbulcke F. Antioxidant responses of Annelids, Brassicaceae and Fabaceae to pollutants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, vol. 114, pp. 273-303.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Tatosyan M.L., Val'kov V.F. The effect of pollution with oil and oil products on the biological status of ordinary chernozems. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, no. 5, pp. 552–556. In Rus.
- 53. Minnikova T.V., Denisova T.V., Mandzhieva S.S., Kolesnikov S.I., Minkina T.M., Chaplygin V.A., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N., Bauer T.V. Assessing the effect of heavy metals from the Novocherkassk power station emissions on the biological activity of soils in the adjacent areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 174, pp. 70–78.
- 54. Minnikova T.V., Denisova T.V., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V. Assessment of agroecological indicators of oil-contaminated chernozem in Rostov oblast after remediation with urea and potassium humate. *Russian Agricultural Sciences*, 2018, vol. 44, no. 2, pp. 177–182. In Rus.
- 55. Trifonova T.A., Zabelina O.N. Changes in the biological activity of heavy metal- and oil-polluted soils in urban recreation territories. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 4, pp. 483–490. In Rus.
- 56. Orecchio S. Contamination from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of a botanic garden localized next to a former manufacturing gas plant in Palermo (Italy). *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 180, pp. 590–601.
- 57. Tian W., Zhao J., Zhou Y., Qiao K., Jin X., Liu Q. Effects of root exudates on gel-beads/reeds combination remediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ecotoxicology* and Environmental Safety, 2017, vol. 135, pp. 158–164.

Received: 08 November 2018.

Information about the authors

Tatiana V. Minnikova, Cand. Sc., junior researcher, Southern Federal University.

Svetlana N. Sushkova, Cand. Sc., senior researcher, Southern Federal University.

Saglara S. Mandzhieva, Cand. Sc., leading researcher, Southern Federal University.

Tatiana M. Minkina, Dr. Sc., professor, head of the department, Southern Federal University.

Sergey I. Kolesnikov, Dr. Sc., professor, head of the department, Southern Federal University.

УДК 621.18

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Сарачева Диана Азатовна¹,

sarachevadiana85@mail.ru

Вахитова Роза Ильгизовна¹,

roza-w@mail.ru

Уразаков Камил Рахматуллович²,

UrazakK@mail.ru

- ¹ Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2.
- ² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. На нефтедобывающих промыслах РФ в настоящий момент нашли применение станции управления установок электроцентробежных насосов, которые имеют возможность изменения частоты вращения двигателя. Такие станции управления могут применяться при увеличении или снижении частоты вращения установки для оптимизации работы системы «установка электроцентробежного насоса – пласт». Учет теплового состояния установки электроцентробежного насоса имеет значение для оптимизации его эксплуатации. Применение асинхронных электродвигателей, позволяющих регулировать без перегревания по-гружной части частоту вращения привода, улучшает эксплуатационные показатели погружных установок. На сегодняшний день отсутствуют всесторонние теоретические исследования по применению станции управления с регулируемой частотой вращения двигателя.

Цель: исследование теплового режима погружной установки в зависимости от содержания скопившегося на приеме центробежного насоса газа.

Объект: установки электроцентробежных погружных насосов (а именно, их тепловой режим).

Результаты. Проведены исследования экспериментальных результатов эксплуатации установки электроцентробежного насоса типа ОДИ RA7–110–1500 с газосепаратором на частотах более 50 Гц. Такие промысловые исследования проводились для оценки добывающих способностей скважины. Эксперименты проводились на частотах 50, 52, 55 Гц с учетом содержания скопившегося газа в пластовой нефти на приеме центробежного насоса и его температуры. Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что напор центробежной установки не зависит от имеющегося газосепаратора. Исследование температурного режима погружной установки проводилось с учетом содержания воды в добываемой нефти, максимального термодинамического равновесного давления пластовой жидкости, характеризующегося процессом выделения газа из нефти, содержания в нефтяном газе азота и метана и давления на входном модуле насоса. Установлено аналитическими расчетами, что к повышению температурного режима погружной установки ведет большое содержание свободного газа в межтрубном пространстве нефтяной скважины.

Ключевые слова:

Установка электроцентробежного насоса, частота вращения двигателя, станция управления, газосодержание, тепловой режим, преобразователи частоты.

Введение

В связи с интенсификацией добычи нефти в Российской Федерации активно внедряется парк погружных установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Для данного процесса характерно увеличение глубины спуска погружной установки, большое содержание механических примесей в пластовой нефти и скапливающегося попутного газа в межтрубном пространстве, повышение температуры добываемой нефти, интенсивное отложение солей на рабочих деталях УЭЦН [1].

Для увеличения добычи нефти применяют различные технологии. К новым методам увеличения производительности установки можно отнести процесс регулирования частоты вращения электроцентробежной установки. Использование регулируемого электропривода позволяет обеспечить значительные экономические и технические достоинства УЭЦН [2]. Изменение частотных характеристик обеспечивает плавное и экономичное регулирование характеристики погружного электродвигателя [3]. Применение частотно-регулируемого электропривода на скважинах, оснащенных УЭЦН, дает возможность производить отбор пластовой жидкости изменением частоты вращения двигателя, сократить периодические режимы в работе скважин и, соответственно, уменьшить число отказов погружной установки, увеличить межремонтный период работы оборудования и надежность УЭЦН [4]. Также применение частотно-регулируемого электропривода облегчает ввод добывающих скважин в эксплуатацию после проведения ремонтных работ [5, 6].

Процесс изменения частоты вращения вала УЭЦН, использующийся для регулирования производительности установки, «из-за перегруза» в некоторых случаях может привести к аварийному выходу из строя установки. Если имеется большой объем попутного газа в добываемой пластовой жидкости, то отказы на кабельной линии могут доходить до половины всех отказов УЭЦН. Такие отказы важно анализировать. В результате проведения испытаний на прочность электрического кабеля на стендовых полигонах уменьшилось значение электрического сопротивления тока, а именно менее чем 5 МОм (критическое значение) при температуре выше 200 °С. Изучение отказов, произошедших в результате перегрузки и оплавки «плоской части» электрического кабеля, демонстрирует, что эти два вида отказов одновременно часто встречаются. Статистические данные отказов указывают на зависимость температуры пластовой нефти, поступающей на входной модуль электроцентробежного насоса (ЭЦН), от места расположения погружной установки. Необходимо разбирать условия, ведущие к интенсивному процессу образования отложений, способствующих оплавке «плоской части» погружного кабеля, и своевременно предлагать мероприятия с целью предупреждения таких отказов. Термическое состояние погружной установки в настоящее время малоизучено и не изложено в достаточном объеме в научной литературе [7, 8].

От работы станции управления (СУ) УЭЦН зависит длительность эксплуатации погружного оборудования, оптимальность работы системы «пласт-скважина-насосная установка».

Станции управления электроцентробежными насосами выполняют следующие задачи: обеспечивают требуемую защиту ЭЦН, необходимый технологический режим добывающих скважин, передачу информационных данных в телеметрические системы, хранение данных, связанных с историей работы СУ [9].

Для регулирования частоты вращения асинхронного погружного двигателя переменного тока применяются преобразователи частоты (ПЧ). ПЧ представляют собой технические устройства, которые преобразуют сетевые параметры на входе в различные частоты на выходе [10]. Современные преобразователи частоты переменного тока имеют широкий частотный диапазон [11].

Применение ПЧ дает возможность осуществить плавное регулирование производительности погружного насоса, плавный пуск и останов без превышения допустимого тока в процессе пуска, вывод после замены УЭЦН или проведения геологических и технических мероприятий на оптимальный технологический режим эксплуатации, быстродействующие максимальные защиты, достигнуть на входе, который практически близок к единице для сохранения качества электрической сети [12, 13].

На нефтедобывающих промыслах России в настоящее время широко используются станции управления установок ЭЦН с переменной частотой напряжения преобразователя. Такие СУ обеспечивают изменение частоты вращения вала погружной установки [14]. К сожалению, на сегодняшний день по использованию таких станций управления нет основательных теоретических исследований. Современные программы не учитывают процесс адаптации работы погружной УЭЦН к меняющимся режимам притока жидкости. Из анализа промысловой практики следует, что в некоторых случаях при применении станций управления с переменной частотой без проведения необходимых расчетов режимов эксплуатации скважины возможен отказ погружной установки.

Исследование теплового режима погружной установки

Для оценивания качества работы добывающей скважины по геологическим и техническим мероприятиям и изменения типоразмера УЭЦН рассмотрим результаты экспериментальной работы погружной установки на повышенных частотах.

Промысловые исследования по повышению частоты напряжения преобразователя погружной установки проводились с целью оценивания возможности увеличения добычи пластовой жидкости без дополнительных капитальных вложений. На нефтяном месторождении выделили для проведения исследований скважину, оснащенную установкой вида ОДИ RA7-110-1500, имеющую следующие параметры:

- дебит пластовой жидкости 93 м³/сут;
- динамический (установившийся) уровень добываемой нефти 693 м;
- водосодержание 30 %;
- давление в нефтесборном трубопроводе 0,96 МПа;
- массовое содержание взвешенных в пластовой нефти частиц 350 мг/л;
- глубина установки (подвески) погружного агрегата 2147 м;
- содержание скопившегося газа на приеме ЭЦН по результатам расчетов составило 21 %.

Сила электрического тока при этом соответствовала 23,9 А, а напряжение преобразователя – 225 В.

В установившемся режиме в процессе эксплуатации погружной установки с частотной характеристикой тока 52 Гц содержание на приеме центробежного насоса скопившегося газа составило 33,4 %. Далее приняли решение повысить частоту электрического тока до 55 Гц. При этом произвели замеры на скважине, получили следующие результаты: повысились значения дебитной характеристики добывающей скважины от 89 до 115 м³/сут, уменьшился динамический уровень пластовой жидкости с 828 до 1236 м, а давление на устье скважины величиной в 1,0 МПа оставалось неизменным. Через 2 месяца эксплуатации этой добывающей скважины отмечалось снижение дебитной характеристики с 115 до 108 м³/сут, а далее по истечении 1 месяца дебит еще уменьшился до 98 м³/сут при значении установившегося (динамического) уровня 1327 м. В дальнейшем из-за высокого значения тока произошла аварийная остановка погружной установки. При расследовании причин аварийного отказа УЭЦН на рабочих элементах насоса имелся твердый налет. Причем погружной электродвигатель не вышел из строя (не был поврежден), а погружной электрокабель, находящийся на уровне ЭЦН, был подвержен действию повышенной температуры (280 °C). У приема газового сепаратора находился скопившийся газ в объеме 38,9 %. Такой режим эксплуатации для установки ОДИ RA7–110–1500 считается нормальным из-за наличия газового сепаратора в составе погружного агрегата.

При использовании погружных электрических двигателей для увеличения эффективности работы УЭЦН регулирование частоты вращения вала электроцентробежного насоса должно осуществляться без перегревания основных частей установки [15]. Изменение частоты тока в погружной установке влечет за собой изменение некоторых эксплуатационных показателей УЭЦН и частоты вращения вала ЭЦН в соответствии с имеющейся классической теорией:

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{Q_1}{Q_0}; \quad \frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^3, \quad (1)$$

здесь Q_0 , Q_1 – значения дебитной характеристики до и после изменения частотной характеристики электрического тока; H_0 , H_1 – напоры установки до и после изменения частотной характеристики электрического тока; v_0 , v_1 – частоты тока; P_0 , P_1 – потребляемые мощности до и после изменения частоты тока.

В рассмотренных выше соотношениях (1), характерных для однородной (однофазной) пластовой продукции, в случае изменения объема скопившегося газа в нефти изменение величины коэффициента полезного действия УЭЦН не берется во внимание. Процессу выделения дополнительного объема скопившегося газа на приеме ЭЦН способствует наличие давления, снижающегося на входном модуле погружного насоса при изменении значения частоты вращения вала насоса. При этом за счет повышения величины частоты электрического тока до 55 Гц наблюдалось понижение коэффициента полезного действия УЭЦН, в том числе в скважине, которая эксплуатировалась месяц после пуска. В процессе увеличения объема свободного газа в межтрубном пространстве непосредственно на входе в электроцентробежный насос с 21 до 39 % эксплуатация установки ОДИ RA7-110-1500 характеризовалась снижением величины коэффициента полезного действия погружной установки.

Проведенные расчеты показывают, что именно завышенный объем свободного газа на приеме ЭЦН способствует повышению температуры центробежного насоса. В работах А.А. Гареева рассмотрено решение вышеуказанной проблемы с учетом допущения того, что максимальное термодинамическое равновесное давление не зависит от такого параметра состояния, как температура [16–18]:

$$Tw = T_{f} + \frac{q_{0}\varphi R_{2} P_{\text{Hac}} P_{\text{mp}}}{2\alpha(1-\varphi)(1-\hat{A})h\tilde{A}P_{\text{ar}}\left(1-\frac{\delta_{\text{H3}}}{R_{2}}\right)} + \frac{q_{0}\varphi R_{2}^{2} P_{\text{Hac}} P_{\text{mp}}}{2\lambda_{\text{H3}}(1-\varphi)(1-\hat{A})h\tilde{A}P_{\text{ar}}}\ln\left(1+\frac{\delta_{\text{H3}}}{R_{2}}\right), \qquad (2)$$

где *T_t* – температура двухфазной смеси на приеме погружного насоса, °К; λ_{μ} – коэффициент теплопроводности попутного газа на корпусе ЭЦН, Вт/(м·К); T_w – температура в корпусе электроцен-тробежного насоса, °К; δ_{μ_3} – величина газовых скоплений на поверхности ЭЦН (около 0,001 м); В обводненность скважины в долях, не более 0,98; q_0 – удельная мощность теплоэнергии, Вт/м³; R_2 – радиус корпусной детали ЭЦН (0,005 м); Рат – давление окружающей среды, Мпа; Р_{нас} – максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, МПа; Г_{ом} - содержание нефтяного газа в пластовой среде, м³/м³; α – коэффициент теплообмена двухфазной смеси при конвекции в рабочих элементах ЭЦН, Вт/(м²·К); h – напорная характеристика ЭЦН с содержанием скопившегося газа в газожидкостной среде, м.

Пусть максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, является величиной, не зависящей от температуры, а объем воды в добываемой жидкости в долях равен единице. Изменение температуры в интервале от приемной сетки входного модуля электроцентробежного насоса до максимального растворенного (дисперсного) состояния скопившегося газа во вну-

тренней полости ЭЦН, с учетом $\ln\left(1+\frac{\delta_{u_3}}{R_2}\right) = \frac{\delta_{u_3}}{R_2}$,

и упростив уравнение (2), определится по формуле:

$$\Delta T_{w} = T_{w} - T_{f} = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \frac{q_{0} R_{2} P_{\text{Hac}} P_{\text{np}}}{2(1 - B)\Gamma h P_{\text{ar}}} \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{H}}}{\lambda_{\text{H}}} \right\}.$$
 (3)

Зависимость (3) можно записать и в другом виде:

$$\Delta T_{w} = T_{w} - T_{f} = \frac{q_{0}R_{2}P_{\text{max}}P_{\text{mp}}}{2h\Gamma P_{\text{ar}}} \left\{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{ma}}}{\lambda_{\text{ma}}}\right\}.$$
 (4)

Обобщая результаты проведенных экспериментов, можно увидеть, что напорная характеристика погружной установки практически не зависит от наличия в составе УЭЦН газового сепаратора (значение коэффициента сепарации составляет не более 20 % у газовых сепараторов различных производств [18, 19]), а зависит от содержания в двухфазной смеси скопившегося газа на приеме ЭЦН:

$$h = f(\varphi). \tag{5}$$

Физический смысл рассмотренного выше выражения (3) состоит в том, что на участке погружного насоса, где изменяется давление от $P_{\rm BX}$ до $P_{\rm Hac}$, наблюдаются дополнительные выделения тепловой энергии при ΔT_w . Расчет объема тепловой энергии в оставшихся участках ЭЦН, где движется однородная жидкость, определяется по известной классической зависимости [20].

Максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, при неизменяющемся объеме нефтяного газа в пластовой жидкости (при известных значениях содержания азота и метана в добываемой нефти) можно определить с учетом температуры $P_{\rm u,t}$ по зависимости [20]:

$$P_{\rm H,t} = P_{\rm H} + \frac{T - T_{\rm n,n}}{9,157 + \frac{701,8}{\Gamma_{\rm om}(y_{\rm M} - 0.8y_{\rm a})}},$$
(6)

здесь y_a, y_m – соответственно объемы азота, метана в скопившемся газе в процессе разгазирования пластовой жидкости (стандартные условия) [16]; $T_{n\pi}$ – пластовая температура среды, °К; Γ_{om} – содержание нефтяного газа в пластовой среде, м³/т; $P_{n,t}$ – максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, при температуре T, МПа; P_{π} – максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, при пластовой температуре, МПа.

В общем случае

$$\Gamma = \rho_{\rm H} \Gamma_{\rm om}, \qquad (7)$$

где $\rho_{\rm H}$ – плотность пластовой жидкости на приеме погружного насоса, т/м³.

Чтобы определить зависимость температуры от величины давления насыщения в (4), учтем давление насыщения в уравнении (5). При температуре двухфазной смеси максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, на входном модуле ЭЦН:

$$P_{_{\rm H,f}} = P_{_{\rm H}} + C_1 (T_f - T_{_{\rm III}}),$$

где

$$C_{1} = \frac{1}{9,157 + \frac{701,8}{\Gamma_{\text{om}}(y_{\text{m}} - 0,8y_{\text{a}})}}.$$
 (8)

Во внутренней полости ЭЦН максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости (6), характеризующееся процессом выделения газа из нефти, при температуре T_w в корпусе электроцентробежного насоса определится по формуле:

$$P_{\rm H,W} = P_{\rm H} + C_1 (T_{\rm W} - T_{\rm m\pi}).$$
(9)

Для облегчения проведения расчетов примем постоянную *C*₂:

$$C_{2} = \frac{\varphi}{1-\varphi} \frac{q_{0}R_{2}P_{np}}{2(1-\hat{A})h\Gamma P_{ar}} \left\{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{n3}}{\lambda_{n3}}\right\}.$$
 (10)

Путем преобразования формул (3), (8), (10) получим уравнение, определяющее температуру ЭЦН с учетом содержания нефтяного газа в пластовой сре-

де (7), обводненности и максимального термодинамического равновесного давления пластовой жидкости (9), характеризующегося процессом выделения газа из нефти, а также давления, установившегося у входного модуля погружной установки:

$$\Delta T_{w} = T_{w} - T_{f} = \frac{P_{\pi} + C_{1} \theta \Delta x}{\frac{1}{C_{2}} - C_{1}},$$
(11)

здесь $\Delta x = L_{c,s} - L_{Hac,B}$, $L_{c,B}$ – глубина залегания кровли продуктивного пласта, м; θ – разница температур в добывающей скважине, °К/м; $L_{Hac,B}$ – глубина расположения погружного агрегата в вертикальной плоскости, м.

Анализ вышеприведенных выражений показывает, что необходимо выполнение неравенства:

$$C_1 \cdot C_2 < 1.$$
 (12)

Из уравнения (11) видно, что для увеличения частоты вращения необходимо определить допустимую величину повышения частоты электрического тока. При учете того, что в составе попутного нефтяного газа содержание азота значительно меньше содержания метана и доля метана равна 0,8, для упрощения преобразуем выражение (11):

$$\frac{1}{C_{1}} = 9,157 + \frac{701,8}{\Gamma_{\rm om}(Y_{\rm M} - 0,8Y_{\rm a})} \approx 9,16 + \frac{702}{\Gamma_{\rm om}Y_{\rm M}} \approx 9,16 + \frac{877}{\Gamma_{\rm om}}.$$
 (13)

Тогда из зависимостей (12) и (13):

$$C_2 \le 9,16 + \frac{877}{\Gamma_{\text{om}}}.$$
 (14)

Таким образом, при повышении содержания нефтяного газа в пластовой среде сужается диапазон изменения постоянной C_2 (14), а именно его величина может уменьшаться до $C_2 \leq 12-13$, иначе возможно критическое увеличение температуры для УЭЦН

$$C_2 = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \frac{q_0 R_2 P_{\rm np}}{2(1 - B)h\Gamma P_{\rm ar}} \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\rm H3}}{\lambda_{\rm H3}} \right\}$$

Ограничение значения постоянной C_2 ведет к

ограничению группы значений:
$$rac{arphi}{1-arphi}rac{q_0R_2P_{
m np}}{2(1-B)h\Gamma P_{
m ar}}.$$

Предположим, что по вышеуказанным данным величина $\frac{\varphi}{1-\varphi}$ (при значении скопившегося газа 0,21, установившегося на входном модуле погружного насоса) изменяется в сторону увеличения от 0,265 до 0,639 (при значении скопившегося газа

0,389, установившегося на входном модуле центробежного насоса). Таким образом, увеличение удельной тепловой энергии θ_0 с одновременным

повышением зависимости
$$\frac{I_{\text{пр}}}{h(\phi)}$$
 (при $h(\phi) \rightarrow 0$), ко-

торое ограничивает в свою очередь диапазон изменения $\frac{\varphi}{1-\varphi}$, установившегося на входном модуле

ЭЦН, происходит вследствие изменения частотной характеристики электрического тока. Поэтому необходимо учитывать, что повышенный объем газа, скопившегося на входном модуле ЭЦН, при повышении частоты вращения вала погружного насоса влечет за собой критическое повышение температуры электроцентробежного насоса.

Анализ результатов проведенных расчетов в рассмотренном случае показал, что при частоте тока 50 Гц температура ЭЦН равна 126 °С, при частоте электрического тока 52 Гц – 148 °С, при частоте электрического тока 55 Гц – 192 °С. Таким образом, к заклиниванию погружного насоса из-за ускоренного отложения солей в рабочих органах насоса ведет повышение температуры ЭЦН до 192 °С при содержании 30 % воды в нефти с содержанием нефтяного газа на приеме ЭЦН в пластовой среде.

С помощью расчетов показано, что повышению температуры погружного насоса способствует увеличенный объем скопившегося газа на приеме ЭЦН. Для недопущения перегрева электродвигателя УЭЦН при проектировании требуемого технологического режима скважины нужно определять тепловое состояние установки ЭЦН.

В результате анализа полученных данных промысловых исследований установлено, что в установившемся режиме эксплуатации погружной установки с частотой электрического тока 50 Гц объем скопившегося газа у входного модуля ЭЦН составил 21 %, с частотой электрического тока 52 Гц объем скопившегося газа у входного модуля погружного насоса - 33,4 %, далее при повышении частоты электрического тока до 55 Гц объем скопившегося газа - 39 %. В случае повышения частоты электрического тока наблюдается увеличение объема скопившегося газа у входного модуля ЭЦН вследствие уменьшения давления, установившегося на входе, и, следовательно, увеличение содержания и давления скопившегося газа в межтрубном пространстве.

Заключение

1. Экспериментальным образом установлено: в нефтедобывающих скважинах с установками

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шарафутдинов Р.Ф., Валиуллин Р.А., Гареев А.А. Проблема солеотложения в установках электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 116–121. DOI: 10.24887/0028–2448–2018–9-116–120.
- Widell B. Saving energy through pump speed control // Design news. - 1995. - V. 50. - № 4. - P. 80.
- Yurish S.Y., Kirianaki N.V., Pallas-Areny R. Universal frequency-to-digital converter for quasy-digital and smart sensors: specifications and applications // Sensor review. 2005. V. 25. № 2. P. 92-99. DOI: 10.1108/02602280510585655.
- Мубаракшин Н.Н., Елпидинский А.А. Разработка методики расчета и планирования удельного расхода электроэнергии насосными агрегатами, оборудованными частотно-регулируемым приводом // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 13. – С. 61–63.

электроцентробежных насосов при повышении значения частоты вращения вала этого насоса в результате изменения частоты электрического тока от 50 до 55 Гц повышается объемное содержание и давление скопившегося газа в межтрубном пространстве, то есть увеличивается содержание газа, скопившегося у входного модуля погружного насоса, вследствие понижения давления на его входе. Установлена взаимосвязь между параметрами: при частоте электрического тока 50 Гц содержание нефтяного газа в пластовой среде у входного модуля погружного насоса составило 21 %, при частоте электрического тока 52 Гц содержание нефтяного газа в пластовой среде у входного модуля погружного насоса – 33,4 %, при частоте электрического тока 55 Гц содержание нефтяного газа в пластовой среде у входного модуля погружного насоса – 39 %, также наблюдались перегрев погружного электрического двигателя и понижение коэффициента полезного действия.

- 2. Определен тепловой режим установки электроцентробежного насоса, учитывающий максимальное термодинамическое равновесное давление пластовой жидкости, характеризующееся процессом выделения газа из нефти, температуру пластовой среды у входного модуля погружного насоса в нефтяных скважинах с высоким содержанием нефтяного газа в пластовой жидкости. Установлено: повышению температуры электроцентробежного насоса способствует повышенное содержание нефтяного газа в пластовой среде у входного модуля погружного насоса при повышении частоты вращения насоса путем изменения частоты вращения двигателя. Температура электроцентробежного насоса соответствовала 126 °С при значении частоты вращения двигателя 50 Гц, температура электроцентробежного насоса соответствовала 148 °С при значении частоты вращения двигателя 52 Гц, и температура электроцентробежного насоса соответствовала 192 °С при значении частоты вращения двигателя 55 Гц.
- Марьенков С.А. Обеспечение непрерывности работы частотнорегулируемого привода энергопотребителей нефтедобычи // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 1. – С. 30–33. DOI: 10.18635/2071–2219–2017–1-30–33.
- Лысова О.А., Фрайштетер В.П., Смирнов А.Ю. Анализ способов пуска установок центробежных электронасосов в осложненных условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 87–96.
- Вахитова Р.И., Сарачева Д.А. Роль теплового режима в установках электроцентробежных насосов // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Альметьевск, 2016. С. 89–90.
- Комплексный расчет температурного режима установки электроцентробежного насоса / С.Е. Здольник, К.Р. Уразаков,

К.А. Бондаренко, А.В. Алфёров // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». – 2010. – № 1. – С. 36–41.

- Alwadie A. A concise review of control techniques for reliable and efficient control of induction motor // International journal of power electronics and drive systems. – 2018. – V. 9. – № 3. – P. 1124–1139. DOI: 10.11591/ijpeds.v9n3.pp1124–1139.
- Новокрещенов О.В., Смык В.В. Преобразователи частоты с улучшенными техническими характеристиками // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2017. – Т. 2. – № 3. – С. 111–112.
- Сабра Камаль, Али Мунзер Сулейман. Особенности работы центробежных насосов с использованием преобразователя частоты вращения // Природообустройство. – 2013. – № 5. – С. 64–67.
- 12. Dieckmann J., Mckenney K., Brodrick J. Variable frequency drives. P. 1. The technology // Ashrae journal. 2010. V. 52. Nº 4. P. 60–62.
- Autonomous ac grid based on multi-infeed voltage source converter stations / G.J. Li, Y.Z. Sun, S.Y. Ruan, B.T. Ooi, S.S. Choi // Electric power components and systems. - 2010. - V. 38. - № 5. - P. 558-574. DOI: 10.1080/15325000903376941.
- Mahmoudi A., Hosseini S.A.A., Zamanian M. Non-stationary analysis of a rotating shaft with geometrical nonlinearity during passage through critical speeds // Applied mathematical modeling. - 2017. - V. 433. - P. 433-449. DOI: 10.1016/j.apm.2017.01.078.

- Shkileva A.A., Sidorenko O.V. Estimation of the economic effect of the use of adjustable ac electric drive at pumping stations // International journal of civil engineering and technology. – 2018. – V. 9. – № 5. – P. 589–593.
- 16. Гареев А.А., Уразаков К.Р. Влияние коэффициента полезного действия центробежного насоса на его тепловой режим // Научно-технический журнал «Оборудование и технологии для нефтепромыслового комплекса». – 2010. – № 5. – С. 21–24.
- Гареев А.А. О значении температурного режима насоса в установках электроцентробежных насосов // Научно-технический журнал «Оборудование и технологии для нефтепромыслового комплекса». – 2009. – № 1. – С. 23–29.
- Гареев А.А. О предельном газосодержании на приеме электроцентробежного насоса // Научно-технический журнал «Оборудование и технологии для нефтепромыслового комплекса». – 2009. – № 2. – С. 21–25.
- Milshtein L.M. Comprehensive evaluation and selection of separators for the oil and gas industry // Chemical and petroleum engineering. 2014. V. 49. № 11-12. P. 727-735. DOI: 10.1007/s10556-014-9826-9.
- 20. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: Изд-во Федерального государственного унитарного предприятия «Нефть и газ» Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.

Поступила 12.09.2019 г.

Информация об авторах

Сарачева Д.А., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электро- и теплоэнергетики Альметьевского государственного нефтяного института.

Вахитова Р.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики Альметьевского государственного нефтяной института.

Уразаков К.Р., доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.
UDC 621.18

DEPENDENCE OF AN ELECTRIC-CENTRIFUGAL PUMP HEAT STATE ON ENGINE ROTATION FREQUENCY

Diana A. Saracheva¹,

sarachevadiana85@mail.ru

. . . .

Roza I. Vakhitova¹, roza-w@mail.ru

Kamil R. Urazakov².

UrazakK@mail.ru

Almetyevsk State Oil Institute,
 Lenin street, Almetyevsk, 423450, Russia.

² Ufa State Oil Technical University,

1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

Relevance. Nowadays in the oil-producing fields of the Russian Federation the control stations of electric centrifugal pumps are widely used. They have the ability to change the engine speed. Such control stations can be used to increase or decrease the rotational speed of the installation to optimize the operation of the «centrifugal pump installation – formation» system. Accounting for thermal condition of the electric centrifugal pump installation is important for optimizing its operation. The use of asynchronous electric motors, which allows regulating the rotational speed of the drive without overheating the immersion part, improves the operational performance of immersion units. To date, there are no comprehensive theoretical studies on application of the control station with an adjustable frequency converter voltage.

The aim of the research is to study thermal regime of a submersible installation depending on content of gas accumulated at the centrifugal pump intake.

Object: installation of electric centrifugal submersible pumps (namely, their thermal regime).

Results. The authors have studied the experimental results of operation of an electric centrifugal pump of the type ODI RA7–110–1500 with gas separator at frequencies of more than 50 Hz. Such field studies were carried out to assess the production capabilities of the well. The experiments were conducted at frequencies of 50, 52, 55 Hz, taking into account the content of gas accumulated in the reservoir oil at the intake of the centrifugal pump and its temperature. The analysis of the results of the experiments showed that the pressure of the centrifugal unit does not depend on the existing gas separator. Temperature mode of the submersible installation was studied taking into account water content of the reservoir oil, saturation pressure, gas factor containing gases such as nitrogen and methane, and pressure at the pump intake. It was established by analytical calculations that high content of free gas in the annular space of an oil well leads to increase in temperature mode of a submersible installation.

Key words:

Electric centrifugal pump installation, engine rotation frequency, control station, gas content, thermal mode, frequency converters.

REFERENCES

- Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Gareev A.A. The problem of scaling in installations of electric centrifugal pumps. *Oil industry*, 2018, no. 9, pp. 116–121. DOI: 10.24887/ 0028-2448-2018-9-116-120. In Rus.
- Widell B. Saving energy through pump speed control. Design news, 1995, vol. 50, no. 4, pp. 80.
- Yurish S.Y., Kirianaki N.V., Pallas-Areny R. Universal frequency-to-digital converter for quasy-digital and smart sensors: specifications and applications. *Sensor review*, 2005, vol. 25, no. 2, pp. 92–99. DOI: 10.1108/02602280510585655.
- 4. Mubarakshin N.N., Elpidinsky A.A. Razrabotka metodiki rascheta i planirovaniya udelnogo raskhoda elektroenergii nasosnymi agregatami, oborudovannymi chastotno-reguliruyemym privodom [Development of methods for calculating and planning the specific energy consumption of pumping units equipped with a variable-frequency drive]. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 2017, vol. 20, no. 13, pp. 61–63.
- Marienkov S.A. Ensuring the continuity of the frequency-controlled drive of energy consumers of oil production. *Energy Security and Energy Saving*, 2017, no. 1, pp. 30–33. DOI: 10.18635 / 2071-2219-2017-1-30-33. In Rus.

- 6. Lysova O.A., Freisteter V.P., Smirnov A.Yu. Analysis of starting methods for centrifugal electric pump installations in complicated conditions. *News of higher educational institutions. Mountain Journal*, 2018, no. 4, pp. 87–96. In Rus.
- 7. Vakhitova R.I., Saracheva D.A. Rol teplovogo rezhima v ustanovkakh elektrotsentrobezhnykh nasosov [Role of thermal conditions in installations of electric centrifugal pumps]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu vysshego neftegazovogo obrazovaniya v Respublike Tatarstan: Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoy otrasli [Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of higher oil and gas education in the Republic of Tatarstan: achievements, problems and prospects for the development of oil and gas industry]. Almetyevsk, 2016. pp. 89–90.
- Zdolnik S.E., Urazakov K.R., Bondarenko K.A., Alferov A.V. Comprehensive calculation of the temperature regime of the electric centrifugal pump installation. *Scientific and Technical Bulletin of Rosneft Oil Company*, 2010, no. 1, pp. 36–41. In Rus.
- Alwadie A. A concise review of control techniques for reliable and efficient control of induction motor. *International journal of power electronics and drive systems*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1124-1139. DOI: 10.11591/ijpeds.v9n3.pp1124-1139.

- Novokreschenov O.V., Smyk V.V. Preobrazovateli chastoty s uluchshennymi tekhnicheskimi kharakteristikami [Frequency converters with improved technical characteristics]. Novaya nauka: strategii i vektory razvitiya, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 111–112.
- 11. Sabra Kamal, Ali Munzer Suleiman. Features of the operation of centrifugal pumps using a rotational frequency converter. *Environmental management*, 2013, no. 5, pp. 64–67. In Rus.
- Dieckmann J., Mckenney K., Brodrick J. Variable frequency drives. P. 1. The technology. *Ashrae journal*, 2010, vol. 52, no. 4, pp. 60–62.
- Li G.J., Sun Y.Z., Ruan S.Y., Ooi B.T., Choi S.S. Autonomous ac grid based on multi-infeed voltage source converter stations. *Electric power components and systems*, 2010, vol. 38, no. 5, pp. 558–574. DOI: 10.1080/15325000903376941.
- Mahmoudi A., Hosseini S.A.A., Zamanian M. Non-stationary analysis of a rotating shaft with geometrical nonlinearity during passage through critical speeds. *Applied mathematical modeling*, 2017, vol. 433, pp. 433–449. DOI: 10.1016/j.apm.2017.01.078.
- Shkileva A.A., Sidorenko O.V. Estimation of the economic effect of the use of adjustable ac electric drive at pumping stations. *International journal of civil engineering and technology*, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 589–593.

- 16. Gareev A.A., Urazakov K.R. Influence of the efficiency of a centrifugal pump on its thermal mode. *Journal Equipment and Technologies for the Oilfield Complex*, 2010, no. 5, pp. 21–24. In Rus.
- 17. Gareev A.A. About the value of the temperature mode of the pump in the electric centrifugal pump installations. *Journal Equipment and Technologies for the Oilfield Complex*, 2009, no. 1, pp. 23-29. In Rus.
- Gareev A.A. On the limiting gas content at the intake of an electric centrifugal pump. *Journal Equipment and Technologies for the Oilfield Complex*, 2009, no. 2, pp. 21–25. In Rus.
- Milshtein L.M. Comprehensive evaluation and selection of separators for the oil and gas industry. *Chemical and petroleum engineering*, 2014, vol. 49, no. 11-12, pp. 727-735. DOI: 10.1007/s10556-014-9826-9.
- Mishchenko I.T. Skvazhinnaya dobycha nefti [Downhole oil production]. Moscow, Oil and Gas Publ. house of the I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2003. 816 p.

Received: 12 September 2019.

Information about the authors

Diana A. Saracheva, Cand. Sc., senior lecturer, Almetyevsk State Oil Institute.

Roza I. Vakhitova, Cand. Sc., associate professor, Almetyevsk State Oil Institute.

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., professor, Ufa State Oil Technical University.

УДК 502.521:622.276

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БИОДЕГРАДАЦИИ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ АССОЦИАЦИЕЙ АБОРИГЕННЫХ НЕФТЕДЕСТРУКТИРУЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Сафаров Альберт Хамитович¹,

Alsaf1978@mail.ru

Водопьянов Владимир Васильевич²,

Vodop@yandex.ru

Ягафарова Гузель Габдулловна¹,

Kafedra_ecologia@mail.ru

Дусаева Яна Маратовна²,

anadusaeva@mail.ru

Акчурина Лилия Рамилевна¹,

Akchurina lr@mail.ru

- ¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450044, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.
- ² Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью мониторинга и прогнозирования изменений, происходящих в нефтезагрязненном грунте, в частности, интенсивности процесса биотрансформации нефти и нефтепродуктов, а также изменения количества органотрофных микроорганизмов во времени. Данные, полученные в результате моделирования процессов в системе почва-нефть-микроорганизмы позволят повысить эффективность очистки нефтезагрязненного грунта и тем самым оздоровить окружающую природную среду.

Целью исследования являлось создание математической модели, воспроизводящей процесс деструкции компонентов тяжелой нефти ассоциацией аборигенных нефтедеструктирующих микроорганизмов.

Объектом исследования выступал грунт, загрязненный тяжелой нефтью Нижне-Кармальского месторождения (Республика Татарстан), а также ассоциация аборигенных нефтедеструктирующих микроорганизмов.

Методы. В качестве базы для моделирования была рассмотрена модифицированная модель Келлера–Сигала, которая учитывала также процессы диффузии нефтепродуктов и хемотаксис микроорганизмов. Система уравнений решалась численно, для чего была написана программа на языке Python. Численное решение осуществлялось методом предиктор–корректор.

Результаты. Проведенная работа состояла из двух этапов – экспериментального и расчетного. В ходе первого этапа работы было произведено исследование процесса биодеструкции нефти и нефтепродуктов консорциумом аборигенных нефтедеструктирующих микроорганизмов. На основании полученных результатов была сформирована база экспериментальных данных. На втором этапе по ранее полученным данным было осуществлено построение математической модели, описывающей процесс биодеструктирующих микроорганизмов. На основании полученных результатов была сформирована база экспериментальных данных. На втором этапе по ранее полученным данным было осуществлено построение математической модели, описывающей процесс биодеградации тяжелой нефти и изменение численности нефтедеструктирующих микрорганизмов в нефтезагрязненном грунте. Проведенные вычисления показали достаточно высокую согласованность расчетных данных с экспериментальными. Полученная модель позволит уже на ранних этапах очистки спрогнозировать мероприятия по экологически безопасным способам очистки нефтезагрязненных грунтов.

Ключевые слова:

Тяжелая нефть, биодеструкция, нефтезагрязненный грунт, аборигенные нефтедеструктирующие микроорганизмы, математическая модель.

Введение

Нефтепромышленный комплекс является основным источником техногенного загрязнения природных биоценозов продуктами добычи и переработки нефти [1]. Одним из перспективных направлений рекультивации техногенно нарушенных земель является совместное применение агротехнических и биотехнологических мероприятий [2–5].

Исследования, проведенные по данной тематике, показали, что высокой степени очистки нефтезагрязненных грунтов, в том числе грунтов, загрязненных высоковязкой нефтью, за достаточно короткое время можно достичь при использовании ассоциации аборигенных нефтедеструктирующих микроорганизмов (АНМ) [1, 6].

Экспериментально установлено, что эффективность процесса биорекультивации техногенно загрязненных земель определяется множеством факторов [7], в частности начальным содержанием нефти и нефтепродуктов, физико-химическими показателями грунта, микробиологическим составом, а также численностью микроорганизмов в самом грунте, наличием фитомелиорантов и т. д. [5, 8–11], в связи с этим достаточно интересным является прогнозирование процесса биодеградации нефтяных загрязнений с помощью математической модели.

Целью выполненного объема работ являлось создание математической модели, воспроизводящей процесс деструкции компонентов тяжелой нефти ассоциацией АНМ.

Наработка базы экспериментальных данных

Для создания моделей, которые описывали бы микробиологические изменения, происходящие в грунтах, загрязненных нефтью, нужны данные, основывающиеся на экспериментальных исследованиях [12–15].

С целью наработки необходимого объема экспериментальных данных была заложена серия опытов. Работу проводили с использованием модельных образцов нефтезагрязненного грунта, где в качестве полютанта использовали тяжелую нефть Нижне-Кармальского месторождения (Республика Татарстан). Характеристики нефти: плотность 0,953 г/см³; вязкость при 20 °C – до 1136 мПа·с; содержание ароматических и поли ароматических соединений 46,4 % мас.; содержание асфальтосмолистых веществ 15,2 % масс. Внесение нефти в почво-грунт производили из расчета 10 г/кг почвы. В опытах использовали серую лесную почву. Нефтезагрязненный грунт укладывали в специальные емкости (40×50×30 см), толщина почвенного слоя в которых составляла 30 см. Суспензию АНМ с титром клеток 10⁸ кл/мл добавляли в почвогрунт из расчета 4 % об. (2,96 % мас.). Контрольными образцами выступали чашки без добавления микробных культур. Эффективность процесса биодеструкции оценивали по изменению концентрации нефти и продуктов ее биотрансформации, остаточное содержание которых измеряли методом ИК-спектрометрии, после экстракции четыреххлористым углеродом [16]. Косвенно интенсивность процесса биодеградации определяли по приросту количества органотрофных микробных клеток [17]. Эксперимент проводили на протяжении 18 месяцев, отбор проб производили в первые 50 дней каждые 10 суток, последующие дни каждые 25 суток. С целью исключения ошибок исследования проводили в 5 повторностях, полученные данные усредняли.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице и на рис. 1, 2.

В результате проведенной работы было установлено, что уже через 12 месяцев после внесения АНОМ содержание нефти и продуктов ее биотрансформации в нефтезагрязненном грунте снизилось в 5,5 раз. А по пришествию 18 месяцев содержание остаточных нефтепродуктов в почве, загрязненной тяжелой нефтью, достигло допустимого уровня.

При этом также отмечено снижение количества органотрофных микроорганизмов в первые 100 суток на 3 порядка, что, возможно, связанно с адаптационным периодом. В последующий период происходит восстановление микробиоценоза почвы. На конец эксперимента численность микробных клеток составила 3·10⁸ кл./г почвы.

Таблица. Степень биотрансформации тяжелой нефти Нижне-Кармальского месторождения

Table.	Degree of biodegradation of heavy oil from the Nizhne-
	Karmalskoye field

	Количество органотрофных микроорганизмов, кл/г почвы Number of organotrophic microorganisms, cells/g of soil		Степень биодеструкции нефти, % Degree of biodegradation, %		
Время, сул Time, day	контроль control	с внесением AHMO with aboriginal petrodestructive microorganisms (APM)	контроль control	с внесением AHMO with aboriginal petrodestructive microorganisms (APM)	
0	$(1\pm0,1)\cdot10^{8}$	$(1\pm0,1)\cdot10^9$	0	0	
10	(9±0,3)·10 ⁷	$(9\pm0,3)\cdot10^8$ 0		0	
20	$(8,5\pm0,1)\cdot10^7$	$(8,5\pm0,1)$ ·10 ⁸	0	0,2	
30	$(5\pm0,2)\cdot10^{6}$	$(5\pm0,1)\cdot10^7$	0	0,5	
40	$(8\pm0,1)\cdot10^{3}$	$(1\pm0,2)\cdot10^{6}$	0	1,5	
50	$(1\pm0,3)\cdot10^{3}$	$(9\pm0,2)\cdot10^{5}$	0	2	
75	$(3\pm0,2)\cdot10^2$	$(7\pm0,1)\cdot10^{5}$	1	9	
100	$(1\pm0,2)\cdot10^2$	$(8,5\pm0,1)$ ·10 ⁵	2	18,5	
125	$(1\pm0,1)\cdot10^2$	$(1\pm0,2)$ ·10 ⁶	3,5	27,75	
150	$(1\pm0,2)\cdot10^2$	$(4\pm0,1)$ ·10 ⁶	5	37	
175	$(1,5\pm0,3)\cdot10^2$	$(5,5\pm0,2)$ ·10 ⁶	8	44,5	
200	$(2\pm0,1)\cdot10^2$	$(8\pm0,2)$ ·10 ⁶	11	52	
225	$(2,5\pm0,2)$ ·10 ²	$(1\pm0,1)\cdot10^7$	14,25	57,25	
250	$(4\pm0,3)\cdot10^2$	$(3\pm0,1)\cdot10^7$	17,5	62,5	
275	$(6\pm0,1)\cdot10^2$	(5±0,2)·107	22,5	67	
300	$(8\pm0,2)\cdot10^2$	$(7\pm0,1)\cdot10^7$	27,5	71,5	
325	$(2\pm0,3)\cdot10^{3}$	(8±0,3)·107	33	74,8	
350	$(7\pm0,1)\cdot10^{3}$	$(1\pm0,1)\cdot10^{8}$	38,5	78	
375	$(2\pm0,1)\cdot10^4$	$(1,58\pm0,1)$ ·10 ⁸	44,5	80	
400	$(1\pm0,3)\cdot10^{5}$	$(2\pm0,2)\cdot10^{8}$	50,5	82	
425	$(7\pm0,2)\cdot10^{5}$	$(2,5\pm0,1)$ ·10 ⁸	56,5	83,5	
450	$(3\pm0,2)\cdot10^{6}$	$(3\pm0,1)\cdot10^{8}$	62,5	85	
475	$(6\pm0,1)\cdot10^{6}$	$(3\pm0,2)\cdot10^{8}$	67,75	86,5	
500	$(8\pm0,2)\cdot10^{6}$	$(3,1\pm0,1)$ ·10 ⁸	73	88	
525	$(8,5\pm0,3)$ ·10 ⁶	$(3,1\pm0,2)$ ·10 ⁸	77,5	88,5	
550 (9±0,1)·10 ⁶		$(3,1\pm0,1)$ ·10 ⁸	81	89	



Рис. 1. Количество органотрофных микроорганизмов

Fig. 1. Number of organotrophic microorganisms



Puc. 2. Результаты процесса биодеструкции нефти АНМ Fig. 2. Results of oil biodegradation by APM

Построение модели процесса биотрансформации нефти микробными клетками

Следующим шагом было моделирование процесса биотрансформации нефти на основе полученных экспериментальных данных. Построение математической модели производили для двух показателей: динамика изменения количества органотрофных микроорганизмов и биодеградация (убыль) нефтепродуктов.

Математическому моделированию и регулированию процессов биотрансформации нефти и других органических веществ в почве посвящены многочисленные публикации, в которых описываются математические модели изменения количества микробных клеток и биотрансформации нефти в почве [12, 18–21]. Достаточно полный обзор точечных моделей биологического разложения нефти приведен в [12], распределенные математические модели рассматривались в [21]. В работе [22] проанализированы труды в зарубежных изданиях по математическому моделированию биотрансформации органических поллютантов в почве.

Динамика численности микробных клеток в грунтах, загрязненных нефтепродуктами, включает 5 этапов: массовая гибель, адаптация, линейный и экспоненциальный прирост, стабилизация. Во многих случаях длительность этапов определяется видом присутствующих микроорганизмов, уровнем загрязнения и химическими свойствами нефти. При невысоких концентрациях нефти первой стадии может и не быть, а этап адаптации в действительности вовсе не соответствует показателям микробиологической активности незагрязненной почвы. На протяжении значительного времени наблюдается выравнивание данных показателей. Процессы диффузии влияют как на содержание нефтепродуктов в грунте, так и на микробиологическую активность почвы - хемотаксис. Математические модели хемотаксиса изучались во многих работах, а в последующем получили название моделей Келлера-Сигала. В частности, в статье [23] была разработана математическая модель биотрансформации нефти в ризосфере растений с использованием диффузии.

При создании математической модели количества микроорганизмов и биодеградации нефти была рассмотрена модифицированная модель из [12], которая учитывала также процессы диффузии нефтепродуктов и хемотаксис микроорганизмов (1):

$$\begin{cases} \frac{\partial M(t,x)}{\partial t} = \\ = M(t,x) \begin{bmatrix} \frac{M_0 - kM(t,x)}{K_M + M(t,x)} \times \\ \times \left(\alpha - \beta \frac{C(t,x)}{K_C + C(t,x)} \right) \end{bmatrix} + k_1 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial Y(t,x)}{\partial t} = \\ = \frac{Y(t,x)}{Y(t,x) + K_{YY}} \begin{pmatrix} vC(t,x) - \\ -\eta \frac{Y(t,x)}{Y(t,x) + K_{YY}} \end{pmatrix} + k_2 \frac{\partial^2 Y(t,x)}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial C(t,x)}{\partial t} = \\ = -C(t,x) \begin{bmatrix} \mu_C \frac{C(t,x)}{K_{SC} + C(t,x)} \times \\ \times \frac{Y(t,x)}{K_{MM} + Y(t,x)} \end{bmatrix} + \delta \frac{\partial^2 C(t,x)}{\partial x^2}, \quad (1) \end{cases}$$

где M(t) – численность микроорганизмов; Y(t) – численность АНМ; C(t) – количество оставшихся в почве нефтепродуктов в момент времени t; t – время, в днях.

В модели основными составляющими кинетики нефти и микроорганизмов в почве взята кинетика Моно. Причины этого связаны с тем, что микроорганизмы вступают во взаимодействие после адсорбирования их на почвенные частицы. Как известно, процессы адсорбции–десорбции в почве хорошо описываются уравнением Ленгмюра [24] (2):

$$q = \frac{q_{\max} \frac{k_a}{k_d}}{1 + \frac{k_a}{k_d}},$$
 (2)

где q – количество адсорбированного вещества (микроорганизмов); k_a , k_d – константы скорости адсорбции и десорбции.

Значение коэффициентов в модели (1) подбирались методом вариации:

$$\begin{aligned} k &= 0, 9, \alpha = 10, \ \beta = 10000, \\ K_{M} &= 10^{9}, K_{C} = 50, \ k_{1} = 0, 1, \\ \nu &= 30, \ \eta = 50, \ K_{YY} = 2 \cdot 10^{8}, \ k_{2} = -0, 1, \\ \lambda_{\bar{N}} &= 40, \ K_{SC} = 1, \ K_{MM} = 10^{7}, \ \delta = 0, 1, \ \mu_{C} = 10. \end{aligned}$$

Система уравнений решалась численно, для чего была написана программа на языке Python. Численное решение осуществлялось методом предиктор-корректор. Системы предиктор-корректор – совокупность способов, принадлежащих к типу алгоритмов, созданных для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Данные методы состоят из двух этапов:

- На первом этапе (предиктор) определяется некоторая функция от значений, рассчитанных на предшествующем этапе, чтобы получить аппроксимированное значение искомой функции в последующей точке.
- На следующем этапе (корректор) корректируется найденное предварительное значение с использованием спрогнозированного значения функции и другого оператора, чтобы провести интерполяцию значения искомой функции в той же самой точке.

Таким образом, очевидно, что начальный этап осуществляется путем явных методов, а последующий предполагает использование формул неявных методов, где справа вместо неопределенной величины u(n+1) ставится результат предсказания u(n+1/2). Применение данного метода для нахождения решений дифференциальных уравнений обеспечивает достаточную точность вычислений и отсутствие показателя самостартуемости (т. е. для начала расчетов по методу предиктор-корректор необходимо изначально использовать другой самостартующий способ).

Проведенные вычисления показали достаточно высокую сходимость расчетных значений с экспериментальными (рис. 3, 4).



Рис. 3. Концентрация нефти (без АНМО)

Fig. 3. Oil concentration (without APM)



Fig. 4. Number of microorganisms (without APM)

При создании математической модели изменения количества микроорганизмов и динамики биодеградации нефти с добавлением АНМ в модель (1) была добавлена функция S(t), которая учитывает добавление в почву АНМ в начальный момент времени (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial M(t,x)}{\partial t} = \\ = M(t,x) \begin{bmatrix} \frac{S(t) + M_0 - kM(t,x)}{K_M + M(t,x)} \times \\ \times \left(\alpha - \beta \frac{C(t,x)}{K_C + C(t,x)} \right) \end{bmatrix} + k_1 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial Y(t,x)}{\partial t} = \\ = \frac{Y(t,x)}{Y(t,x) + K_{YY}} \begin{pmatrix} vC(t,x) + S(t) - \\ -\eta \frac{Y(t,x)}{Y(t,x) + K_{YY}} \end{pmatrix} + k_2 \frac{\partial^2 Y(t,x)}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial C(t,x)}{\partial t} = \\ = -C(t,x) \begin{bmatrix} \mu_C \frac{C(t,x)}{K_{SC} + C(t,x)} \times \\ \times \frac{Y(t,x)}{K_{MM} + Y(t,x)} \end{bmatrix} + \delta \frac{\partial^2 C(t,x)}{\partial x^2}; \\ S(t) = \alpha_S e^{-t^4}, \end{cases}$$
(3)

где M(t) – численность микроорганизмов; Y(t) – численность АНМ; C(t) – количество оставшихся в почве нефтепродуктов в момент времени t; S(t) – функция, определяющая количество АНМ, внесенных в почву; t – время, в днях.

Данная система уравнений также решалась с применением метода предиктора-корректора. Коэффициенты для данной модели получились следующими:

$$k = 0,9, \ \alpha = 5, \ \beta = 5000,$$

$$K_{M} = 5 \cdot 10^{9}, \ K_{C} = 50, \ k_{1} = 0.1;$$

$$v = 150, \ \eta = 80, \ K_{YY} = 2 \cdot 10^{8}, \ k_{2} = -0,1;$$

$$\lambda_{C} = 250, \ K_{SC} = 6, \ K_{MM} = 9 \cdot 10^{6}, \ \delta = -0,1, \ \mu_{C} = 20;$$

$$\alpha_{L} = 100$$

Сравнение полученных коэффициентов с коэф фициентами математической модели (1) показывает их несущественное изменение. В то же время можно отметить, что повышение общей численности микроорганизмов из-за внесенной ассоциации и увеличение численности нефтедеструктирующих микроорганизмов приводит к росту коэффициентов, отвечающих за интенсивность биотрансформации нефти. В первую очередь эта скорость возрастает в связи с увеличением числа микробных клеток, подвергающих биотрансформации нефть и продукты ее распада. Полученные результаты хорошо согласовывались с экспериментальными данными (рис. 5, 6).



Fig. 5. Oil concentration (with APM)

Заключение

Таким образом, полученная модель адекватно описывает процессы, происходящие в нефтезагрязненном грунте, в частности интенсивность изменения количества микробных клеток, а также уменьшение концентрации нефтепродуктов во

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Повышение эффективности рекультивации нефтезагрязненных грунтов / Г.Г. Ягафарова, Л.Р. Акчурина, Ю.А. Федорова, И.Р. Ягафаров, А.Х. Сафаров // Башкирский химический журнал. – 2011. – Т. 18. – № 2. – С. 72–74.
- Коршунова Т.Ю., Четвериков С.П., Логинов О.Н. Перспективы использования консорциума углеводородокисляющих микроорганизмов для очистки нефтезагрязнённой почвы крайнего севера // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 1. С. 88–94.
- Биогенное окисление высоковязкой нефти ашальчинского месторождения и ее гетероорганических соединений / Д.А. Филатов, Е.Б., Кривцов Н.Н. Свириденко, А.К. Головко, Л.К. Алтунина // Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 4. С. 386–393.
- Алтунина Л.К., Сваровская Л.И. Микробиологический метод глубокой очистки нефтешлама, загрязненного вязкой нефтью месторождения Цаган-Элс (Монголия) // Нефть. Газ. Новации. – 2016. – № 6. – С. 50–54.
- Wicke D., Böckelmann U., Reemtsma T. Environmental influences on the partitioning and diffusion of hydrophobic organic contaminants in microbial biofilms // Environmental science and technology. 2008. V. 42. № 6. P. 1990-1996.
- Биоремедиация грунтов, загрязненных тяжелой нефтью / Г.Г. Ягафарова, А.К. Мазитова, С.В. Леонтьева, А.Х. Сафаров, Д.Р. Вахитова // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – С. 75–80.
- Seng P. Handbook of microbiological soil remediation. Karlsruhe: Landesanstaltt fuer Umweltschutz Baden-Wuertenberg und Forschungzentrum, 1991. - 131 p.
- Biodegradation pattern of hydrocarbons from a fuel oil-type complex residue by an emulsifier-producing microbial consortium / M. Nievas, M. Commendatore, J. Esteves, V. Bucala // Journal of Hazardous Materials. 2008. V. 154. № 1–3. P. 96–104.
- Biodegradation of petroleum hydrocarbon vapors: laboratory studies on rates and kinetics in unsaturated alluvial sand / P. Hohener, P. Duwig, G. Pasteris, K. Kaufmann, N. Dakhel, H. Harms // Journal of Contaminant Hydrology. 2003. V. 66. № 1–2. P. 93–115.
- 10. Biodegradation of organic chemicals in soil/water microcosms system: Model development / L. Liu, J.A. Tindall, M.J. Friedel,



Рис. 6. Численность микроорганизмов (с АНМО)

Fig. 6. Number of microorganisms (with APM)

времени. Данные, полученные в результате прогнозирования системы почва-нефть-микроорганизмы, позволят повысить эффективность очистки нефтезагрязненного грунта и тем самым оздоровить окружающую природную среду.

W. Zhang // Water, Air, and Soil Pollution. - 2007. - V. 178. - № 1-4. - P. 131-143.

- Lee E., Banks M.K. Bioremediation of petroleum contaminated soil using vegetation: a microbial study // Journal of Environmental Science and Health. Part A. - 1993. - V. 28. - № 10. -P. 2187-2198.
- Водопьянов В.В., Гузаиров М.Б., Киреева Н.А. Математическое моделирование процессов в антропогенно нарушенных почвенных биосистемах. – М.: Машиностроение, 2010. – 232 с.
- Prommer H., Barry D., Davis G. Modelling of physical and reactive processes during biodegradation of a hydrocarbon plume under transient groundwater flow conditions // Journal of Contaminant Hydrology. 2002. V. 59. № 1–2. P. 113–131.
- Ефремов Г.И. Моделирование химико-технологических процессов. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 255 с.
- Иванов В.И. Математические методы в биологии. Кемерово: Изд-во КемГУ, 2012. – 196 с.
- 16. Природоохранный нормативный документ федерального уровня 16.1:2.2.22–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. – СПб.: Акционерное общество закрытого типа «Спектр-М», 1998. – 12 с.
- Герхардт Ф. Методы общей бактериологии. В 3-х томах. М.: Мир, 1983. – 536 с.
- Моделирование динамики органического вещества почв / А.В. Смагин, Н.Б. Садовникова, М.В. Смагина и др. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 2001. – 120 с.
- El-Kadi A. Modeling hydrocarbon biodegradation in tidal aquifers with water-saturation and heat inhibition effects // Journal of Contaminant Hydrology. 2001. V. 51. № 1-2. P. 97-125.
- Wanner O., Reichert P. Mathematical modelling of mixedculture biofilms // Biotechnol. Bioeng. – 1996. – V. 49. – № 2. – P. 172–184.
- Росновский И.Н. Системный анализ и математическое моделирование процессов в почвах. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 312 с.
- 22. Поташев К.А., Малов П.В., Бреус И.П. Учет биодеградации в математических моделях транспорта органических загрязни-

телей в природных пористых средах. Обзор современной литературы // Ученые записки Казанского университета. – 2011. – Т. 153. – Кн. 3. – С. 144–170.

- Водопьянов В.В., Водопьянова Л.Л. Математическое моделирование биодеградации нефти в ризосфере растений с использованием диффузии // Вестник Уфимского государственного авиационного университета. 2014. Т. 18. № 4. С. 178–182.
- 24. Decontamination of polyaromatic hydrocarbons from soil by steam stripping: mathematical modeling of the mass transfer and energy requirement / O. Braass, C. Tiffert, J. Hohne et al. // Journal of Environmental Science and Technology. - 2003. -V. 37. - № 21. - P. 5001-5007.

Поступила: 11.02.2019 г.

Информация об авторах

Сафаров А.Х., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной экологии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Водопьянов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры математики Уфимского государственного авиационногол технического университета.

Ягафарова Г.Г., доктор технических наук, профессор кафедры прикладной экологии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Дусаева Я.М., магистрант кафедры математики Уфимского государственного авиационного технического университета.

Акчурина Л.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной экологии Уфимского государственного нефтяного технического университета. UDC 502.521:622.276

PREDICTION OF HEAVY OIL BIODEGRADATION BY ASSOCIATION OF ABORIGINAL PETRODESTRUCTIVE MICROORGANISMS

Albert H. Safarov¹,

Alsaf1978@mail.ru

Vladimir V. Vodopyanov²,

Vodop@yandex.ru

Guzel G. Yagafarova¹,

Kafedra_ecologia@mail.ru

lana M. Dusaeva²,

Yanadusaeva@mail.ru

Lilya R. Akchurina¹,

Akchurina lr@mail.ru

- ¹ Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450044, Russia.
- ² Ufa State Aviation Technical University,
 12, Karl Marks street, Ufa, 450008, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to monitor and predict changes in oil-contaminated soil, in particular, to intensify biodegradation of oil and oil products, as well as changes in the number of organotrophic microorganisms over time. The data, obtained from modeling in the system «soil-oil-microorganisms», will increase the efficiency of cleansing oil-contaminated soil and thereby improve the environment.

The aim of the research was to create a mathematical model reproducing heavy oil components degradation by association of indigenous petrodestructive microorganisms.

The object of the study is the heavy oil-contaminated soil of the Nizhne-Karmalskoe field, as well as the association of indigenous petrodestructive microorganisms.

Methods. The modified Keller–Segal model, which also takes into account the processes of diffusion of petroleum products and the hemotaxis of microorganisms, was used as a database for modeling. The system of equations was solved numerically, using a specially developed in the Python language program. The numerical solution was carried out using the predictor–corrector method.

Results. The work consisted of two stages – experiment and calculation. During the first stage of the work, the biodegradation of oil and petroleum products was studied by a consortium of indigenous oil destructive microorganisms. On the basis of the obtained results, the experimental data base was established. At the second stage, according to the previously obtained data, the authors constructed a mathematical model describing heavy oil biodegradation and changes in the number of oil-destructing microorganisms in oil-contaminated soil. The calculations showed great consistency of estimated data with experimental ones. The obtained model would predict measures for environmental friendly methods of cleaning oil-contaminated soils at the early stages of cleaning.

Key words:

Heavy oil, biodegradation, oil-contaminated soils, aboriginal petrodestructive microorganisms, mathematical model.

REFERENCES

- Yagafarova G.G., Akchurina L.R., Fedorova Y.A., Yagafarov I.R., Safarov A.H. Improvement of the efficiency of oil-contaminated soil recultivation. *Bashkir chemical journal*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 72–74. In Rus.
- Korshunova T.Y., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Prospects for the use of a consortium of hydrocarbon-oxidizing microorganisms for the purification of oil-contaminated soil of the far North. *Theoretical and applied ecology*, 2016, no. 1, pp. 88–94. In Rus.
- Filatov D.A., Krivtsov E.B., Sviridenko N.N., Golovko A.K., Altunina L.K. Biogennoe okislenie vysokovyazkoy nefti ashalchinskogo mestorozhdeniya i ee geteroorganicheskikh soedineniy [Biogenic oxidation of high-viscosity oil of Ashalchinskoye field and its heteroorganic compounds]. *Neftekhimiya*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 386–393.
- Altunina L.K., Svarovskaya L.I. Mikrobiologicheskiy metod glubokoy ochistki nefteshlama, zagryaznennogo vyazkoy neftyu

mestorozhdeniya Cagan-Els (Mongoliya) [Microbiological method of deep purification of oil sludge-contaminated viscous oil deposits of Tsagan-ELS (Mongolia)]. *Neft. Gaz. Novacii*, 2016, no. 6, pp. 50–54.

- 5. Wicke D., Böckelmann U., Reemtsma T. Environmental influences on the partitioning and diffusion of hydrophobic organic contaminants in microbial biofilms. *Environmental science and technology*, 2008, vol. 42, no. 6, pp. 1990–1996.
- Yagafarova G.G., Mazitova A.K., Leonteva S.V., Safarov A.H., Vakhitova D.R. Bioremediation of heavy oil-contaminated soils. SOCAR Proceedings, 2016, no. 3, pp. 75–80. In Rus.
- Seng P. Handbook of microbiological soil remediation. Karlsruhe, Landesanstaltt fuer Umweltschutz Baden-Wuertenberg und Forschungzentrum, 1991. 131 p.
- Nievas M., Commendatore M., Esteves J., Bucala V. Biodegradation pattern of hydrocarbons from a fuel oil-type complex residue by an emulsifier-producing microbial consortium. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 154, no. 1–3, pp. 96–104.

- Hohener P., Duwig P., Pasteris G., Kaufmann K., Dakhel N., Harms H. Biodegradation of petroleum hydrocarbon vapors: laboratory studies on rates and kinetics in unsaturated alluvial sand. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, vol. 66, no. 1-2, pp. 93-115.
- Liu L., Tindall J.A., Friedel M.J., Zhang W. Biodegradation of organic chemicals in soil/water microcosms system: model development. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, vol. 178, no. 1–4, pp. 131–143.
- Lee E., Banks M.K. Bioremediation of petroleum contaminated soil using vegetation: a microbial study. *Journal of Environmental Science and Health. Part A*, 1993, vol. 28, no. 10m pp. 2187-2198.
- Vodopyanov V.V., Guzairov M.B., Kireeva N.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessov v antropogenno narushennykh pochvennykh biosistemakh [Mathematical modeling of processes in anthropogenically disturbed soil biosystems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 232 p.
- Prommer H., Barry D., Davis G. Modelling of physical and reactive processes during biodegradation of a hydrocarbon plume under transient groundwater flow conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2002, vol. 59, no. 1–2, pp. 113–131.
- Efremov G.I. Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Modeling of chemical technology processes]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017. 255 p.
- Ivanov V.I. Matematicheskie metody v biologii [Mathematical methods in biology]. Kemerovo, Kemerovo state University Publ., 2012. 196 p.
- 16. Prirodookhranny normativny dokument federalnogo urovnya 16.1:2.2.22-98. Metodika vypolneniya izmereny massovoy doli nefteproduktov v mineralnykh, organogennykh, organomineralnykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii [Federal level environmental regulation] 16.1: 2.2.22-98. Methodologies for measuring procedures of mass fraction of oil products in mineral, organogenic, organomineral soils and sedi-

ments by the method of IR-spectrometry. St-Petersburg, Spectrum-M closed joint-stock company Publ., 1998. 12 p.

- 17. Gerhardt F. *Metody obshchey bakteriologii* [Methods of general bacteriology]. Moscow, Mir Publ., 1983. 536 p.
- Smagin A.V., Sadovnikova M.V., Smagina M.V. Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva pochv [Modeling the dynamics of soil organic matter]. Moscow, Moscow State University Publ., 2001. 120 p.
- El-Kadi A. Modeling hydrocarbon biodegradation in tidal aquifers with water-saturation and heat inhibition effects. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, vol. 51, no. 1–2, pp. 97–125.
- Wanner O., Reichert P. Mathematical modelling of mixedculture biofilms. *Biotechnol. Bioeng*, 1996, vol. 49, no. 2, pp. 172–184.
- Rosnovsky I.N. Sistemny analiz i matematicheskoe modelirovanie protsessov v pochvakh [System analysis and mathematical modeling of processes in soils]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2007. 312 p.
- 22. Potashev K.A., Malov P.V., Breus I.P. Uchet biodegradatsii v matematicheskikh modelyakh transporta organicheskikh zagryazniteley v prirodnykh poristykh sredakh. Obzor sovremennoy literatury [Accounting of biodegradation in mathematical models of transport of organic pollutants in natural porous media. A review of the contemporary literature]. Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta, 2011, vol. 153, no. 3, pp. 144–170.
- Vodopyanov V.V., Vodopyanova L.L. Mathematical modeling of oil biodegradation in the rhizosphere of plants using diffusion. *Bulletin of Ufa State Aviation University*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 178–182. In Rus.
- Braass O., Tiffert C., Hohne J. Decontamination of polyaromatic hydrocarbons from soil by steam stripping: mathematical modeling of the mass transfer and energy requirement. *Journal of En*vironmental Science and Technology, 2003, vol. 37, no. 21, pp. 5001-5007.

Received: 11 February 2019.

Information about the authors

Albert H. Safarov, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Vladimir V. Vodopyanov, Dr. Sc., professor, Ufa State Aviation Technical University.

Guzel G. Yagafarova, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Iana M. Dusaeva, graduate student, Ufa State Aviation Technical University.

Lilya R. Akchurina, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.311

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СУШКА ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МАЛОЙ ГЛУБИНОЙ ПРОНИКНОВЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОСБРОСА РАДИАЦИЕЙ И КОНВЕКЦИЕЙ. II. СТАДИЯ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ СУШКИ

Саломатов Владимир Васильевич^{1,2},

salomatov.vv@mail.ru

Карелин Вадим Александрович^{1,2},

vad2hen@mail.ru

Саломатов Василий Владимирович²,

vvsalomatov@mail.ru

¹ Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

Актуальность исследования продиктована необходимостью разработки математических моделей СВЧ-нагрева и МВ-сушки влажных материалов для получения технологически оптимальных и экономически выгодных режимов. Настоящая публикация является продолжением статьи тех же авторов в «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», в которой с помощью математического моделирования подробно была изучена первая стадия сушки – стадия прогрева, когда теплообмен между поверхностью влажного тела и окружающей средой осуществляется за счет радиации и конвекции, а СВЧ-энергия поглощается поверхностным слоем из-за малой её глубины проникновения. Построены асимптотические решения этой нелинейной задачи для малых и больших значений безразмерного времени, востребованные инженерной практикой, как для параметрического анализа, так и для проведения оперативных расчетов. Подход, связанный с рассмотрением второй стадии – стадии постоянной скорости сушки – основан на более детальном изучении теплопереноса, а расчет скорости сушки ведется с использованием аппроксимационной зависимости А.В. Лыкова. Также предложено условие сшивки тепловых режимов I и II стадий процесса сушки.

Цель: постановка задачи второго этапа СВЧ-сушки влажного материала – этапа постоянной скорости сушки – и реализация теоретического решения по определению распределения температурного поля по толщине слоя и величины скорости сушки.

Объектом исследования является плоский слой влажного материала – уголь, песок, древесина и др. капиллярно-пористые массивы, на которые воздействует СВЧ-излучение. Такие материалы обладают высокой диэлектрической проницаемостью и как следствие весьма эффективно поглощают СВЧ-излучение, которое почти на 100 % преобразуется в тепловую энергию.

Методы исследования связаны с математическим моделированием, в основе которого лежат уравнения электродинамики Максвелла и тепловлагопереноса А.В. Лыкова. В данной статье задача Максвелла решена независимо от задачи тепломассопереноса, поэтому плотность потока СВЧ-излучения считается известной. Также одной из особенностей данной задачи является рассмотрение материалов с малой глубиной поглощения, в силу чего в системе уравнений для нагрева источниковый член находится в граничном условии.

В результате исследования с привлечением условий стационарного температурного поля и постоянства во времени плотности потока влагосодержания сформулирована и решена задача распределения температурного поля по толщине влажной пластины, которое строго следует закону квадратной параболы. Скорость сушки II стадии и критическое влагосодержание в конце II стадии определены из корреляционных зависимостей А.В. Лыкова. Дана сшивка решений для I и II стадии. Выполнен анализ построенных решений.

Ключевые слова:

СВЧ-энергия, электромагнитная сушка, капиллярно-пористый массив, теплоизлучение, конвекция, уравнения тепловлагопереноса А.В. Лыкова, скорость сушки.

Введение

Обзор литературных источников [1–9] по применению электромагнитных волн для сушки влажных материалов показывает, что данная сфера исследований неуклонно расширяется. Связано последнее главным образом с особенностями поведения такого важного электрофизического параметра, как диэлектрическая проницаемость воды. Она имеет максимум в области СВЧ-диапазона электромагнитных волн. В результате электромагнитной сушки энергия на испарение воды из влажного материала доставляется за счет поглощения СВЧ-излучения, так как подсушиваемая среда изза наличия влаги всегда обладает диэлектрическими свойствами.

Для СВЧ-сушки выделены следующие частоты: 433, 915 и 2450 МГц. Как правило, энергия микроволн подводится к высушиваемому объекту с помощью волноводов. В качестве генераторов СВЧ-излучения наибольшее распространение получили магнетроны.

Известны неоспоримые преимущества сушки микроволнами [10-15]: равномерный объемный нагрев, тепловая безынерционность, избиратель-

ный саморегулирующий нагрев, так как сушка подсушенных мест самопроизвольно прекращается. В этой связи с уменьшением влажности пропорционально снижается тангенс диэлектрических потерь и расход СВЧ-энергии существенно экономится.

Следует принять во внимание, что вводимая СВЧ-мощность возрастает с увеличением частоты микроволнового излучения, но одновременно с этим ростом уменьшается глубина проникновения электромагнитного излучения, и оно становится практически поверхностным источником. Диэлектрическая сушка незаменима в тех случаях, когда требуется высокая скорость сушки. В этих режимах СВЧ-сушка является рентабельной за счет снижения капзатрат в связи с сокращением длительности самой сушки [16–18].

Основой теории электромагнитной сушки является поиск закономерностей переноса тепла и влаги во влажных материалах в процессе облучения электромагнитными волнами при наличии фазового превращения воды в пар.

Как показывает эксперимент, термическая обработка влажного материала включает в себя три стадии: начальная – прогрев, средняя – сушка с постоянной скоростью, заключительная – падающая скорость сушки. В работе полагается, что физические свойства материала постоянны.

Процесс испарения идет исключительно с поверхности влажного тела. Температура поверхности в этом периоде остается неизменной.

Для сушки важное значение имеет знание температуры материала. В периоде постоянной скорости сушки температура материала равна температуре мокрого термометра, если подвод тепла, необходимого для испарения влаги и нагревания материала, осуществляется нагретым воздухом. При наличии дополнительного подвода тепла теплопроводностью и теплоизлучением температура материала на его поверхности будет выше температуры мокрого термометра.

На первой стадии – стадии прогрева – жидкость практически не удаляется. Здесь вся приходящая энергия тратится на нагрев влажного материала. На второй стадии подводимая энергия расходуется главным образом на испарение влаги и повышения температуры тела нет. Эта стадия постоянной скорости сушки. Главная её особенность состоит в том, что тепловой режим становится стационарным, все характеристики слоя не меняются со временем и не зависят от начального состояния. Сама скорость сушки равна постоянному значению и не меняется на данной стадии. После чего наступает третья стадия – стадия падающей скорости сушки, когда оставшаяся влага окончательно испаряется, а температура материала растет вплоть до равновесия с окружающей средой. Математически параметры влажного тела для второй стадии приобретают вид [19, 20]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0, \qquad \frac{\partial q_{II}}{\partial t} = 0, \qquad \frac{\partial j_{II}}{\partial t} = 0, \qquad \frac{\partial u}{\partial t} = \text{const.}$$

Здесь первое условие говорит о стационарности процесса сушки; второе и третье условия свидетельствуют о том, что поток тепла и поток влаги принимают постоянные значения и во времени не претерпевают изменения; и, наконец, четвертое условие утверждает, что влагосодержание в слое убывает по времени с одной и той же скоростью.

Стадия постоянной скорости сушки

Данная стадия характеризуется следующими условиями (1).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0, \qquad \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{j_n}{\rho_0 l},$$
 (1)

где j_n – плотность потока влаги у поверхности тела (или интенсивность сушки); l – полутолщина слоя.

Уравнение стационарной теплопроводности с внутренним источником имеет вид:

$$a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon r_p j_n}{c\rho_0 l} = 0; \qquad (2)$$

Здесь $\varepsilon = \frac{d_i u}{du}$ – коэффициент фазового превра-

щения жидкости в пар, равный отношению изменения влагосодержания за счет испарения к общему изменению влагосодержания; r_p – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг.

Интегрируя (2) получим:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\varepsilon r_p j_n}{\lambda l} x + c_1.$$
(3)

При этом граничным условием для (3) является выражение (4).

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0; \quad c_1 = 0; \tag{4}$$

$$T(x) = \frac{\varepsilon r_p j_n}{\lambda l} \frac{x^2}{2} + c_2.$$
 (5)

Для выражения (3) должно выполняться также второе краевое условие (6):

$$\frac{dT}{dx}\Big|_{x=1} = \frac{q_w}{\lambda} - \frac{\alpha}{\lambda}(T(l) - T_c) - \frac{\varepsilon_2 \sigma_0}{\lambda}(T^4(l) - T_c^4) - \frac{r_p}{\lambda}(1 - \varepsilon) j_n(l, t);$$
(6)

$$\frac{q_w}{\lambda} - \frac{\alpha}{\lambda} (T(l) - T_c) - \frac{\varepsilon_2 \sigma_0}{\lambda} (T^4(l) - T_c^4) - \frac{r_p j_n}{\lambda} = 0.$$
(7)

Здесь (7) – алгебраическое уравнение 4 степени, которое разрешено в радикалах. Действительный положительный корень равен

$$T(l) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{-A + B} + \sqrt{A - B \pm \frac{2a}{b\sqrt{-A + B}}} \right),$$
$$A = \frac{4 \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{3}} c}{(9a^{2}b + \sqrt{3}\sqrt{27a^{4}b^{2} + 256b^{3}c^{3}})^{\frac{1}{3}}};$$

где

где

$$B = \frac{(9a^{2}b + \sqrt{3}\sqrt{27a^{4}b^{2} + 256b^{3}c^{3}})^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{1}{3}}3^{\frac{2}{3}}b};$$

$$a = -\frac{\alpha}{\lambda};$$

$$b = -\frac{\varepsilon_{2}\sigma_{0}}{\lambda};$$

$$c = -\frac{q_{w}}{\lambda} - \frac{\alpha}{\lambda}T_{c} - \frac{\varepsilon_{2}\sigma_{0}}{\lambda}T_{c}^{4} + \frac{r}{\lambda}j_{n}.$$

Тогда

$$T(l) = \frac{\varepsilon r_p j_n}{\lambda} \frac{l}{2} + c_2;$$

$$c_2 = T(l) - \frac{\varepsilon r_p j_n}{\lambda} \frac{l}{2}.$$
(8)

Подставим (8) в (5) и получим окончательное решение (9):

$$T(x) = T(l) - \frac{\varepsilon r_p j_n l}{2\lambda} \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right).$$
(9)

Типичный вид распределения выглядит следующим образом – рисунок.

Для расчетов взяты следующие параметры:

$$\begin{split} &\alpha = 10, \ \frac{\mathbf{B}_{\mathbf{T}}}{\mathbf{M}^{2}}; \ \varepsilon_{2} = 0.9; \ r_{p} = 2,3 \cdot 10^{6}, \ \frac{\mathbf{M}_{\mathbf{K}}}{\mathbf{K}_{\mathbf{\Gamma}}}; \\ &q_{w} = 12 \cdot 10^{3}, \ \frac{\mathbf{B}_{\mathbf{T}}}{\mathbf{M}^{2}}; \ T_{c} = 300, \ \mathbf{K}; \ l = 0, 1, \ \mathbf{M}; \\ &\lambda = 0, 2, \ \frac{\mathbf{B}_{\mathbf{T}}}{\mathbf{M} \cdot \mathbf{K}}; \ j_{n} = 10^{-4}, \ \frac{\mathbf{K}_{\mathbf{T}}}{\mathbf{M}^{2}\mathbf{c}}; \ \varepsilon = 0, 5. \end{split}$$

Исходя из уравнения (2), распределение температуры внутри влажного тела подчиняется закону параболы второй степени (9), а само решение в критериальном виде подчиняется следующему выражению

$$\frac{T(l) - T_c}{T_c - T_0} = \frac{1}{2} \operatorname{Ki}_{m_{ll}} \varepsilon \operatorname{KoLu.}$$
(10)

(11)

Теплообменный и массообменный критерии Кирпичева зависит друг от друга на этой стадии следующим образом:

 $\operatorname{Ki}_{q_{H}} = \operatorname{Ki}_{m_{H}} \operatorname{LuKo},$

$$\operatorname{Lu} = \frac{a_m}{a}, \text{ Ko} = \frac{r\overline{u}_0}{cT_c}, \text{ Ki}_{q_m} = \frac{q_n l}{\lambda T_c}, \text{ Ki}_{m_m} = \frac{j_n l}{a_m \rho_0 q_0}.$$

Если обозначить скорость сушки через N (%/с) во второй стадии $N = \left(\frac{dw}{dt}\right)_{II}$, то Кі_тбудет связан с этой характеристикой следующим образом:

$$\operatorname{Ki}_{m_{II}} = \frac{l^2 N}{a_m W_0}.$$
 (12)

Конец стадии постоянной скорости сушки определяется критическим влагосодержанием (средним по объему), которое находится из выражения [19]:

$$\frac{W_{\mathrm{\kappa p}_{n}} - W_{p}}{W_{0} - W_{p}} = \frac{1}{3} \operatorname{Ki}_{m} \left(1 + \varepsilon \frac{r \delta a_{m}}{c a} \right).$$
(13)



Рисунок. Температура слоя в зависимости от глубины слоя. x=0 – задняя поверхность слоя, x=l=0,1 m – поверхность, на которую падает СВЧ-волна

Figure. Layer temperature depending on the depth of the layer. x=0 is the back surface of the layer, x=l=0,1 m is the surface on which the microwave wave falls

Список условных обозначений величин

$$q_{II}$$
 – поток тепла, $\frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M}^2}$;

 q_w – поток тепла на поверхности, $\frac{BT}{M^2}$;

- *Т* температура по глубине слоя, К;
- и влагосодержание;
- \overline{u}_0 среднее влагосодержание;
- *t* время, с;
- *х* декартова координата, м;
- *l*-полутолщина плоского слоя, м;

 $c_2, \rho_0, \lambda, r_p, \varepsilon, a_m, a_M^T$ – теплофизические характеристики материала:

теплоемкость, плотность, теплопроводность, удельная теплота парообразования,

коэффициенты испарения, диффузии влаги и термодиффузии влаги соответственно;

а-коэффициент температуропроводности;

- α коэффициент конвективного теплообмена, $\frac{BT}{M^2 K}$;
- ε₂ степень черноты поверхности;

 σ_0 – константа теплового излучения абсолютно черной поверхности, $\frac{BT}{r^2 t^4}$;

 T_c – температура окружающего пространства, К;

 j_{II} – плотность потока влаги, $\frac{K\Gamma}{M^2 c}$;

 j_n – плотность потока влаги на поверхности, $\frac{K\Gamma}{M^2 c}$;

- $Ki_m = \frac{jwl}{a_m \rho_0 u_0}$ массобменный критерий Кирпичева;
- $Ki_q = \frac{q_w l}{\lambda T_c}$ теплообменный критерий Кирпичева.

Заключение

Рассмотрен процесс электромагнитной сушки влажного плоского слоя на II стадии – стадии постоянной скорости сушки. В условиях стационарного температурного поля и постоянства во времени плотности потока влагосодержания сформулирована и решена задача распределения температурного поля по толщине влажной пластины. Данное решение имеет параболическую структуру. Температура на поверхности пластины найдена из балансового соотношения нагрева и испарения в режиме малой глубины проникновения микроволнового излучения как действительный положительный корень алгебраического уравнения четвертой степени. Скорость сушки II стадии и критическое влагосодержание в конце II стадии определены из корреляционных зависимостей А.В. Лыкова. Дается сшивка решений для I и II стадии.

Исследование и постановка задачи для стадии постоянной скорости сушки выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН, поиск приближенных аналитических решений выполнен за счет гранта РФФИ (№ 17-08-00752).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коновалов Н.П. Технология деструкции бурых углей методом нагрева энергией сверхвысоких частот. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – 92 с.
- Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters / Yi-du Hong, Bai-quan Lin, He Li, Huaming Dai, Chuan-jie Zhu, HaoYao // Applied Thermal Engineering. - 2016. - V. 93. - P. 1145-1154.
- 3. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: A coupled electromagnetic and heat transfer model / Baiquan Lin, He Li, Zhongwei Chen, Chunshan Zheng, Yidu Hong, ZhengWang // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 126. P. 949–962.
- Meda V., Orsat V., Raghavan V. Microwave heating and the dielectric properties of foods // The Microwave Processing of Foods. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. – P. 23–43. URL: https://www.elsevier.com/books/the-microwave-processing-offoods/regier/978-0-08-100528-6 (дата обращения 28.09.2019).
- Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses / Zhanlong Song, Chuanming Jing, Liansheng Yao, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang, Yanpeng Mao, Chunyuan Ma // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 143. – P. 69–78.
- Faisal Mushtaq, Ramli Mat, Farid Nasir Ani. Fuel production from microwave assisted pyrolysis of coal with carbon surfaces // Energy Conversion and Management. - 2016. - V. 110. -P. 142-153.
- Drying behavior of lignite under microwave heating / Zhanlong Song, Liansheng Yao, Chuanming Jing, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang & Chunyuan Ma // Drying Technology. -2017. - V. 35. -P. 433-443.
- Radha Raman Mishra, Apurbba Kumar Sharma. Microwave-material interaction phenomena: heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. - 2016. - V. 81. - P. 78-97.
- Temperature rise characteristics of Zhun Dong coal during microwave pyrolysis / Huan-Peng Liu, Tai-Ping Chen, Yang Li, Zhen-Yu Song, Shao-Wei Wang, Shao-Hua Wu // Fuel Processing Technology. - 2016. - V. 148. - P. 317-323.
- Хайдурова А.А., Федчишин В.В., Коновалов Н.П. Микроволновая сушка бурых углей и повышение их технологических

характеристик // Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2010. – С. 31–35.

- 11. Methods and systems for processing solid fuel. US20090272028A1 United States: pat. USA 2007/0295.590.
- Effect of microwave irradiation on the preparation of iron oxide/arenaceous clay sorbent for hot coal gas desulfurization / Yu Feng, Tianqi Hu, Mengmeng Wu, Ju Shangguan, Huilin Fan, Jie Mi // Fuel Processing Technology. - 2016. - V. 148. -P. 35-42.
- Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with microwave treatment / He Li, Baiquan Lin, Wei Yang, Chunshan Zheng, Yidu Hong, Yabin Gao, Tong Liu, Shiliang Wu // International Journal of Coal Geology. - 2016. -V. 154-155. - P. 82-91.
- Activated carbon obtained from sapelli wood sawdust by microwave heating for o-cresol adsorption. / P.S. Thue, G.S. dos Reis, E.C. Lima, J.M. Sieliechi, G.L. Dotto, A.G.N. Wamba, S.L.P. Dias, F.A. Pavan // Research on Chemical Intermediates. February 2017. V. 43. Iss. 2. P. 1063–1087.
- Effect of microwave irradiation on petrophysical characterization of coals / Hong Yi-du, Lin Bai-quan, Zhu Chuan-jie, Li He // Applied Thermal Engineering. - 5 June 2016. - V. 102. -P. 1109-1125.
- Jing Sun, Wenlong Wang, Qinyan Yue. Review on microwavematter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies // Materials. - 2016. - P. 231. DOI: 10.3390/ma9040231.
- Reddy B.R., Vinu R. Microwave assisted pyrolysis of Indian and Indonesian coals and product characterization // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 154. – P. 96–103.
- Microwave absorption characteristics of anthracite during pyrolysis / Zhiwei Peng, Xiaolong Lin, Xuejiao Wu, Jiann-Yang Hwang, Byoung-Gon Kim, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang // Fuel Processing Technology. 2016. V. 150. P. 58–63.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Изд-во «Высшая школа» 1967. – 600 с.
- Лыков А.В. Теория сушки. М.: Изд-во «Энергия», 1968. 471 с.

Поступила 04.10.2019 г.

Информация об авторах

Саломатов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета; главный научный сотрудник института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Карелин В.А., аспирант кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета; инженер-исследователь института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Саломатов В.В., кандидат физико-математических наук, ведущий программист института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

UDC 621.311

ELECTROMAGNETIC DRYING OF WET MATERIALS WITH A SMALL DEPTH OF PENETRATION OF MICROWAVE RADIATION IN THE CONDITIONS OF HEAT REMOVAL BY RADIATION AND CONVECTION. II. STAGE OF CONSTANT DRYING SPEED

Vladimir V. Salomatov^{1,2},

salomatov.vv@mail.ru

Vadim A. Karelin^{1,2},

vad2hen@mail.ru

Vasiliy V. Salomatov²,

vvsalomatov @mail.ru

¹ Novosibirsk State University,

1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia

² Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze SB RAS,

1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is dictated by the need to develop mathematical models of microwave heating and MW-drying of wet materials to obtain technologically optimal and cost-effective modes. This publication is a continuation of the article by the same authors in «Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering», in which the authors using mathematical modeling, studied in detail the process at the first stage of drying \neg the heating stage, when heat exchange between the surface of a moist body and the environment is due to radiation and convection \neg energy is absorbed by the surface layer due to its small depth of penetration. The authors constructed the asymptotic solutions of this nonlinear problem for small and large values of dimensionless time demanded by engineering practice, both for parametric analysis, and for carrying out operational calculations. The approach associated with the consideration of the second stage, the stage of constant drying rate, is based on a more detailed study of heat transfer, and the calculation of the rate of drying is carried out using the approximation dependence of A.V. Lykov. The paper proposes a condition for cross-linking of thermal modes of I and II stages of drying.

The aim of the research is the state of the problem of the second stage of microwave drying of wet material -a stage of constant drying rate -a and implementation of a theoretical solution to determine the distribution of the temperature field across the layer thickness and the magnitude of the drying rate.

The object of the research is a flat layer of wet material – coal, sand, wood, and other capillary-porous arrays, which are affected by microwave radiation. Such materials have a high dielectric constant and, as a result, very effectively absorb microwave radiation, which is almost 100 % converted to thermal energy.

The research methods are associated with mathematical modeling, which are based on Maxwell's electrodynamics equations and A.V. Lykov heat and moisture transfer. In this article, the Maxwell problem is solved independently of the problem of heat and mass transfer; therefore, the flux density absorbed by microwave radiation is known. Also, one of the features of this problem is the consideration of materials with a small absorption depth, that is why the source term in the system of equations for heating is in the boundary condition.

As a result of the research, the authors involving the stationary temperature field conditions and the constancy of the moisture content flux density over time stated and solved the problem of temperature field distribution across the thickness of the wet plate, which strictly follows the square parabolic law. The drying speed of the II stage and the critical moisture content at the end of the II stage were determined from A.V. Lykov correlation dependencies. The paper introduces the stitching solutions for the I and II stages and the analysis of the constructed solutions.

Key words:

Microwave energy, electromagnetic drying, capillary-porous massif, heat radiation, convection, A.V. Lykov heat and moisture transfer equations, drying speed.

The statement of the problem and solution for the stage of constant drying rate were performed within the framework of the state task IT SB RAS, the search for approximate analytical solutions was done with the support of the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 17-08-00752.

REFERENCES

- 1. Konovalov N. P. *Tekhnologiya destruktsii burykh ugley metodom nagreva energiey sverkhvysokikh chastot* [Technology of brown coal destruction by the method of heating by energy of ultrahigh frequencies]. Irkutsk, IrSTU Publ. house, 2000. 92 p.
- Yi-du Hong, Bai-quan Lin, He Li, Hua-ming Dai, Chuan-jie Zhu, HaoYao. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 93, pp. 1145–1154.
- Baiquan Lin, He Li, Zhongwei Chen, Chunshan Zheng, Yidu Hong, Zheng Wang. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: A coupled electromagnetic and heat transfer model. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 126, pp. 949-962.
- Meda V., Orsat V., Raghavan V. Microwave heating and the dielectric properties of foods. *The Microwave Processing of Foods*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2017. pp. 23-43. Available at: https://www.elsevier.com/books/the-microwave-processing-offoods/regier/978-0-08-100528-6 (accessed 28 September 2019).

- Zhanlong Song, Chuanming Jing, Liansheng Yao, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang, Yanpeng Mao, Chunyuan Ma. Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 143, pp. 69–78.
- Faisal Mushtaq, Ramli Mat, Farid Nasir Ani. Fuel production from microwave assisted pyrolysis of coal with carbon surfaces. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 110, pp. 142-153.
- Zhanlong Song, Liansheng Yao, Chuanming Jing, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang, Chunyuan Ma. Drying behavior of lignite under microwave heating. *Drying Technology*, 2016, vol. 35, pp. 433-443.
- Radha Raman Mishra, Apurbba Kumar Sharma. Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, vol. 81, pp. 78–97.
- Huan-Peng Liu, Tai-Ping Chen, Yang Li, Zhen-Yu Song, Shao-Wei Wang, Shao-Hua Wu. Temperature rise characteristics of Zhun Dong coal during microwave pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 148, pp. 317–323.
- Khaidurova A.A., Fedchishin V.V., Konovalov N.P. Mikrovolnovaya sushka burykh ugley i povyshenie ikh tekhnologicheskikh kharakteristik [Microwave drying of brown coals and increasing their technological characteristics]. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki* [Izvestiya Universities. Problems of energy]. Kazan, KGEU Publ., 2010. pp. 31-35.
- Drozd J.M., Druga M.C., Lawson S.L., Lang F.Ch., Bullis H.L. Methods and systems for processing solid fuel. US20090272028A1 United States. Patent.
- 12. Yu Feng, Tianqi Hu, Mengmeng Wu, Ju Shangguan, Huilin Fan, Jie Mi. Effect of microwave irradiation on the preparation of iron

oxide/arenaceous clay sorbent for hot coal gas desulfurization. Fuel Processing Technology, 2016, vol. 148, pp. 35-42.

- He Li, Baiquan Lin, Wei Yang, Chunshan Zheng, Yidu Hong, Yabin Gao, Tong Liu, Shiliang Wu. Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with microwave treatment. *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 154–155, pp. 82–91.
- 14. Thue P.S., Dos Reis G.S., Lima E.C., Sieliechi J.M., Dotto G.L., Wamba A.G.N., Dias S.L.P., Pavan F.A. Activated carbon obtained from sapelli wood sawdust by microwave heating for o-cresol adsorption. *Research on Chemical Intermediates*, February 2017, vol. 43, Iss. 2, pp. 1063–1087.
- Hong Yi-du, Lin Bai-quan, Zhu Chuan-jie, Li He. Effect of microwave irradiation on petrophysical characterization of coals. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 102, pp. 1109–1125.
- Jing Sun, Wenlong Wang, Qinyan Yue. Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies. *Materials*, 2016, pp. 231. DOI: 10.3390/ma904023.
- Reddy B.R., Vinu R. Microwave assisted pyrolysis of Indian and Indonesian coals and product characterization. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 154, pp. 96–103.
- Zhiwei Peng, Xiaolong Lin, Xuejiao Wu, Jiann-Yang Hwang, Byoung-Gon Kim, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang. Microwave absorption characteristics of anthracite during pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 150, pp. 58–63.
- Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.
- Lykov A.V. *Teoriya sushki* [The theory of drying]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 471 p.

Received: 4 October 2019.

Information about the authors

Vladimir V. Salomatov, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State University; senior researcher, Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze SB RAS

Vadim A. Karelin, postgraduate, Novosibirsk State University; research engineer, Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze SB RAS

Vasiliy V. Salomatov, Cand. Sc., leading programmer Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze SB RAS

УДК 622.834; 622.847

ХАРАКТЕРИСТИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОРЫВОВ ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ИЗ ВЫШЕЛЕЖАЩИХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Ефремов Евгений Юрьевич,

Efremov-eu@mail.ru

Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность. Прорывы воды и обводненных осадочных масс в горные выработки представляют серьезную угрозу для добычи полезных ископаемых подземным способом. За последние два десятка лет на шх. «Соколовская» произошел ряд аварий, связанных с прорывами глинистых масс в выработанное пространство. Самая масштабная из них привела к гибели двух человек, на восстановление рудника ушло несколько месяцев.

Цель: определение источников повышенного водного питания зоны обрушения для снижения риска прорывов обводненных глинистых масс на горизонты выпуска в условиях производства работ под водоносными горизонтами осадочного чехла.

Методы: анализ прорывов отложений, произошедших за период с 2003 по 2017 гг. В качестве критерия классификации используется объём глинистых пород, проникающих в горные выработки во время отдельного зарегистрированного прорыва. Выявление особенностей пространственного и временного распределения классифицированных аварий. Геостатистический анализ параметров водоносных горизонтов. Сопоставление параметров водоносных горизонтов и распределения аварий.

Результаты. Основная часть крупных прорывов приурочена к очистным работам на нижних рабочих горизонтах, в области обрушения северной и центральной групп воронок. Прорывы происходят, как правило, во время начальной стадии отработки рудного тела на нижнем горизонте, в дальнейшем их частота и объем снижаются. Необходимым условием формирования масштабных прорывов является повышенная обводненность области обрушения. Источниками повышенного питания групп воронок центральной и северной являются области высоких остаточных водяных столбов Мелового водоносного горизонта на севере и западе. Основным путем снижения прорывов является рациональная организация осушения массива пород вмещающего месторождения, направленная на целевое осушение обводненных участков Мелового горизонта.

Ключевые слова:

Воронка обрушения, область обрушения, водопритоки, прорыв, глинистые отложения, затопление.

Введение

Прорывы воды и обводненных масс в горные выработки являются источником серьезных аварийно-опасных и катастрофических явлений на подземных рудниках. В мировой практике одна из самых масштабных катастроф произошла в 1970 г. на руднике «Mufulira», Замбия. Хвосты обогащения проникли в горные выработки сквозь обрушенные породы на глубину более километра, во время аварии погибло 89 человек, значительная часть рудника выведена из строя на несколько лет [1, 2].

В последние годы, по сравнению с другими странами, остро стоит проблема в КНР. С 2000 по 2013 гг. произошел 1131 инцидент, где погибло 4533 человека. Около трети человек погибло в авариях с массовой гибелью людей (более 10 человек – 94 случая, более 30 человек – 9 случаев) [3].

Причинами большинства крупнейших аварий, связанных с затоплением подземных рудников, являются неправильное размещение хвостов производства или прорывы воды из старых затопленных горных выработок [4–6].

На территории РФ в последние годы крупнейшими авариями являются затопление в 2003 г. шх. «Западная-Капитальная» в Ростовской области [7] и затопление рудника Мирный в Якутии. Обе аварии сопровождались человеческими жертвами, первая послужила причиной ликвидации шахты, вторая – консервацией рудника, как минимум до 2020 г. [8]. Источником опасности в первом случае являлись заполненные водой горные выработки ликвидированной шахты, во втором – вода в карьере, расположенном над шахтой

Наряду с упомянутыми источниками аварий, серьезную угрозу подземным горным работам представляют прорывы воды и глинистых масс из вышележащих осадочных отложений. Эта проблема может сопутствовать-разработке угольных [9–11] и рудных месторождений. Примерами последних являются аварии на рудниках Темир-Тау, Шерегешское, Таштагольское, Гороблагодатское и др. [12].

Одним из ярких примеров среди этого ряда является шх. «Соколовская», РК. Прорывы песчаноглинистых масс в горные выработки явились причиной неоднократных аварий. Самая масштабная из них привела к гибели двух человек, в горные выработки попало свыше 37 тыс. м³ отложений [13].

Изучение геологических и геотехнических особенностей, сбор информации и ее интерпретация являются ключом к учету опасностей при подземных горных работах [14]. При разработке месторождения системой с обрушением кровли в условиях вышележащего осадочного чехла в деятельности, направленной на снижение опасности прорывов в горные выработки, требуется учитывать особенности формирования и накопления обводненных отложений в зоне обрушения и их переноса на горизонты выпуска.

Условия разработки месторождения

Шахта «Соколовская» расположена на северном фланге Соколовского месторождения, добыча руды ведется подземным способом системой с обрушением кровли. Отметка земной поверхности составляет около 185 м.

Месторождение перекрыто осадочным чехлом, мощность которого составляет около 110 м. В Осадочных породах прослеживается два основных водоносных горизонта.

Олигоценовый водоносный горизонт. Абсолютная отметка уровня подземных вод 176 м, мощность 5 м. Водовмещающими породами являются олигоценовые пески с коэффициентом фильтрации до 5 м/сутки, мощность песков достигает 8–9 м. Подошва горизонта сложена чеганскими глинами, мощностью 20–30 м.

Верхнемеловой меловый водоносный горизонт. Водовмещающими породами являются меловые пески, мощность песков около 36 м, коэффициент фильтрации до 10 м/сутки. На данный момент абсолютная отметка уровня воды составляет около 94 м. Основание водоносного горизонта сложено глинами коры выветривания, местами пески залегают на палеозойском фундаменте.

На поверхности шахтного поля сформировалась зона обрушения, обладающая сложным строением. Размер области обрушения составляет 1,6 км по простиранию и 0,6 км вкрест. Многочисленные первичные и повторные выходы объединены в четыре группы, в общих чертах соответствуя геометрии отработанных рудных тел.

В институте ВИОГЕМ под руководством Д.М. Казикаева был проведен ряд исследований на стендах из эквивалентных материалов, в ходе которых были выявлены закономерности проникновения глинистых осадочных пород на горизонты выпуска на Соколовском месторождении [15]. При обрушении кровли, после посадки междукамерных целиков, быстро формируется трубообразная воронка обрушения, достигающая земной поверхности практически с любой глубины (исследования проводились до глубины 400 м, на данный момент глубина очистных работ превышает 500 м, характер обрушения не поменялся). Высокоподвижные обводненные песчано-глинистые массы при этом легко проникают на горизонт выпуска двумя вариантами:

- непосредственно через воронку обрушения и оперяющие зияющие трещины, благодаря постоянному относительному перемещению кусков обрушенных скальных пород;
- через образующиеся пустоты, заполненные глинистым материалом. Пустоты сохраняются какое-то время в нетронутом состоянии, опускаются вслед за извлечением руды. Пустоты разрушаются при приближении к почве очистной единицы, выпуская отложения в пространство горизонта выпуска.

Основными факторами, влияющими на процесс проникновения глинистых отложений, являются: наличие обширных каналов перепуска в пространстве нарушенного массива, образующегося вследствие обрушения кровли, и обводненность массива.

Как показали последние исследования, проникновению отложений через толщу нижерасположенных скальных пород способствуют тиксотропные свойства чеганских глин [16] в условиях естественной и техногенной сейсмичности [17] и геодинамической активности [18, 19].

Задачей исследований является анализ наблюдаемых случаев прорывов глинистых отложений на горизонты выпуска с целью выявления закономерностей и особенностей, позволяющих снизить ущерб, причиняемый производству.

Анализ выходов песчано-глинистых отложений

Исходными данными для анализа служили результаты мониторинга прорывов песчано-глинистых отложений (ПГО), фиксирующие дату и локализацию выходов отложений, их вещественный состав и комментарии.

Для анализа все выходы ПГО классифицированы на три категории в соответствии с масштабом проявления. К первой категории относятся масштабные выходы ПГО, вызывающие закрытие скреперных выработок и/или проникающие в зону откаточных выработок. Как правило, такой выход вызывает закрытие откаточных выработок на несколько дней или недель. Ориентировочные объемы ПГО превышают сотню и могут достигать нескольких тысяч кубических метров. Вторая категория включает выходы ПГО, влияющие на работу одной скреперной выработки, в т. ч. вызывающие перекрытие одной или нескольких выпускных воронок. Максимальный объем вышедших ПГО, попавших во вторую категорию, составляет первые десятки кубических метров. Третья категория включает появление элементов ПГО в составе пород, добываемых из очистной единицы, практически не влияющих на очистные работы. Максимальный объем отложений, попадающий в третью категорию, не превышает нескольких кубических метров (таблица).

В связи с тем, что объём выходов ПГО в журнале не фиксировался, ориентировочный средний объём определен по экспертным оценкам, на основе габаритов выработок, и может отличаться от реального.

Дальнейший анализ заключался в сопоставлении пространственного и временного распределения выходов отложений с геологическим строением месторождения, строением области обрушения, периодичностью и положением очистных работ, геотехнической, гидрогеологической информацией.

На рис. 1 приведен график ориентировочного объема поступлений отложений на горизонты выпуска по времени. Следует отметить, что общий объем вышедших отложений во время аварии 2005 г. составляет около 38 тыс. м³, примерно в 55 раз превышает средний объем выходов I категории, и не может быть адекватно отражен в масштабе графика. Из рис. 1 видно, что объемы поступления глинистых отложений за разные периоды крайне неравномерны.

При привлечении данных по времени и срокам отработки очистных единиц прослеживается, что выходы отложений приурочены к циклу отработки рудного тела и сосредоточены на начальной стадии отработки рудного тела.

Для рассмотрения пространственного распределения выходов осадочных отложений на основе планов горных работ была создана упрощенная цифровая модель предприятия, включающая положение очистных единиц на горизонтах выпуска и положение воронок на земной поверхности.

Основное упрощение касается формы очистных единиц, их горизонтальное сечение предполагается неизмененным, а за высоту очистной единицы принята разница отметок между горизонтами выпуска. На данную модель нанесены положения зафиксированных выходов ПГО в соответствии с разработанной классификацией.

В связи с тем, что земная поверхность многократно подрабатывалась очистными работами на разных горизонтах, зона обрушения содержит большое количество повторных воронок, которые выходят на поверхность ликвидированных (засыпанных скальной массой) воронок. В результате этого зона обрушения представляет собой четыре относительно независимые группы воронок. Проведенные исследования объемов воронок показали, коэффициент разрыхления обрушенного массива изменяется с глубиной очистных работ, в зависимости от соотношения осадочных и скальных пород в массиве над очистными единицами [20].

Таблица.	Классификация зарегистрированных выходов глини-
	стых отложений

Table. Classification of registered mud inrushes

Категория Rank	Минимальный; мак- симальный объём, м ³ Min; max volume, m ³	Ориентировочный средний объем, m ³ Estimated volume, m ³	Характеристика Characteristic	Кол-во событий Amount of accidents
I (100; 40000) 520		520	Приводит к закрытию скре- перных выработок или ча- стичному подтоплению отка- точных выработок Mud causes slusher drift clo- sing or mud partially floods the haulage drift	21
II	(8; 100)	60	Влияние на работу скреперной выработки Mud affects the mode of opera- tion in the slusher drift	18
III (0; 8) 4 II M		4	Появление в составе скальных пород Mud appears among ore in the finger raise	19(58)*

* Без скобок – количество независимых событий, зарегистрированных в различных очистных единицах, в скобках – количество связанных событий, включающих повторные выходы отложений в одной очистной единице.

* Amount of isolated accident in isolated finger raises is without parenthesis; amount in parenthesis includes series of accidents in same finger raises.



Объем выходов ПГО на горизонты выпуска

Рис. 1. График объемов поступлений ПГО в выработанное пространство

Fig. 1. Diagram of mud volume in flooded underground working



Рис. 2. Положение выходов ПГО из зоны обрушения

Fig. 2. Spatial distribution of mud inrushes from the caved zone

На рис. 2 изображены горизонты выпуска, на которых фиксировались положения выходов отложений, их категории и положение групп воронок на земной поверхности.

Из рис. 2 видно, что более 70 % выходов ПГО первой категории локализуются в нескольких очистных единицах горизонтов –190 и –260 м, расположенных на двух участках месторождения. Первый из участков включает очистные единицы, расположенные в центральном рудном теле, в границах линий 9–10 координатной системы предприятия. Второй расположен на северном фланге месторождения, в границах линий 79–105. Этим участкам соответствуют две объединенные группы воронок. Выходы воронок на поверхность отклоняются на запад, в сторону лежачего бока, вследствие наклонного строения рудного тела.

Всего на поверхности месторождения присутствуют четыре группы объединенных воронок, однако большинство выходов ПГО связаны лишь с



Рис. 3. Распределение мощности остаточных столбов воды в Меловом горизонте

Fig. 3. Contour map of water level in Cretaceous aquifer

двумя из них. По-видимому, причина концентрации прорывов отложений связана с особенностями водного питания зоны обрушения. Не вызывает сомнений, что гидрогеологические условия массива, окружающего месторождения, оказывают влияние на горнотехническую ситуацию [21, 22]. Для выявления источников водопритоков в область обрушения привлечены данные мониторинга гидрогеологических скважин.

Анализ данных наблюдательных скважин в олигоценовом водоносном горизонте, расположенном на отметке 176 м, показал, что характер водопритока в область обрушения имеет равномерный характер по всей площади обрушения, не может служить источником повышенного водного питания групп воронок северной и центральной.

Другая картина наблюдается при анализе данных гидрогеологических скважин Мелового водоносного горизонта, расположенного на отметке 95 м. На рис. 3 изображено распределение остаточных столбов воды Мелового горизонта. На изображении заметно, что распределение воды в Меловом горизонте неравномерно. В целом по месторождению уровень остаточных столбов составляет около 5-6 м. Выделяются участки, на которых высота столбов значительно превышает среднее значение по месторождению. Один из этих участков расположен на северном фланге месторождения, максимальный уровень воды здесь доходит до 20 м. Другой расположен на юго-западе месторождения, уровень воды достигает 10 м.

Водопритоки из этих областей обеспечивают повышенное питание водой участков обрушения, на которых наблюдается концентрация выходов глинистых отложений на горизонты выпуска.

Результаты анализа

Результаты проведенных исследований можно свести к нескольким положениям:

- 1. Область обрушения на поверхности имеет сложное строение, от отдельных выходов воронок до объединенных провалов. Выделяются четыре группы объединенных воронок, вызванные отработкой наиболее крупных рудных тел.
- 2. Большинство (70 %) из наиболее масштабных случаев прорывов происходят из области обрушения двух групп воронок северной и центральной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Szwedzicki T. Geotechnical precursors to large-scale ground collapse in mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2001. V. 38. № 7. P. 957–965.
- Brady B.H.G., Brown E.T. Rock mechanics: for underground mining. – Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007. – 628 p.
- Sun W., Zhou W., Jiao J. Hydrogeological classification and water inrush accidents in China's coal mines // Mine Water and the Environment. 2016. V. 35. № 2. Р. 214–220. URL: doi.org/10.1007/s10230-015-0363-3 (дата обращения 28.09.2019).

- Распределение количества прорывов или объемов перенесенных отложений не имеет какоголибо цикличного характера.
- 4. Основные прорывы приурочены к очистным работам на нижних рабочих горизонтах, в области обрушения северной и центральной групп воронок. Происходят, как правило, во время начальной стадии отработки рудного тела на нижнем горизонте, в дальнейшем частота и объем прорывов снижаются.
- Необходимым условием формирования масштабных прорывов является повышенная обводненность области обрушения. Источниками повышенного питания групп воронок центральной и северной являются области высоких остаточных водяных столбов Мелового водоносного горизонта.

Заключение

В результате проведенных работ были определены особенности временного и пространственного распределения прорывов глинистых отложений на горизонты выпуска. На основании механизма формирования и проникновения глинистых масс выделены основные факторы, влияющие на количество осадочных отложений, проникающих в выработки, – обводненность вышележащего массива и нарушенность строения вышележащего массива процессом обрушения кровли. Выделены основные области концентрации выходов осадочных отложений на горизонты выпуска, связанные с обширными областями обрушения, и им соответствующие воронки на земной поверхности.

Достигнута основная цель – определены источники водного питания зоны обрушения в областях прорывов отложений в горные выработки. Ими являются участки Мелового горизонта, расположенные на северном фланге и юго-западе месторождения.

Полученные данные позволяют значительно снизить количество и объем прорывов осадочных отложений на горизонты выпуска. Основным путем снижения прорывов является рациональная организация осушения массива пород вмещающего месторождения, направленная на целевое осушение обводненных участков Мелового горизонта.

- Seymour C. Mining disasters What lessons can be learnt // Queensland Mine Safety Conference. – Queensland, Australia, 2005. – P. 19–31. URL: http://www.qldminingsafety.org.au/ _dbase_upl/SafeConf05.pdf (дата обращения 28.09.2019).
- Vutukuri V.S., Singh R.N. Mine inundation-case histories // Mine water and the environment. 1995. V. 14. № 1. P. 107-130.
- Job B. Inrushes at British collieries: 1851 to 1970 // Colliery Guardian. - 1987. - V. 235. - № 5. - P. 192-201.
- Анализ инженерных решений при спасении людей на шахте «Западная-Капитальная» ООО «Компания «Ростовуголь» во время аварии 23.10.03 / С.Г. Пелих, В.В. Родимов, В.Е. Бор-

зяк, В.П. Шаповалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 2. – С. 191–193.

- Трифонова П. «Алроса» начнет восстанавливать рудник «Мир» в 2020 году // Ведомости. 27 апреля 2018. URL: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2018/04/27/ 768142-alrosa-nachnet (дата обращения 28.09.2019).
- Bringemeier D. Inrush and mine inundation a real threat to Australian coal mines? // International Mine Water Association Annual Conference. Bunbury, Australia 30 September 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/281593908_Inrush_and_mine_inundation_-_A_real_threat_to_Australian_coal_mines (дата обращения 28.09.2019).
- Overburden failure and the prevention of water and sand inrush during coal mining under thin bedrock / W. Yang, X. Xia, G. Zhao, Y. Ji, D. Shen // Mining Science and Technology (China). - 2011. - V. 21. - № 5. - P. 733-736.
- Zhou W., Li G. Impact of karst water on coal mining in North China // Environmental Geology. – 2006. – V. 49. – № 3. – P. 449–457. DOI: 10.1007/s00254–005–0102–3.
- Дубынин Н.Г., Храмцов В.Ф., Шеховцов В.С. Предотвращение прорывов глинистых пород при разработке рудных месторождений. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – 124 с.
- Усанов С.В., Крутиков А.В., Мельник Д.Е. Обеспечение промышленной безопасности при разработке соколовского железорудного месторождения подземным способом в условиях обводненной налегающей толщи // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4. – С. 82–89. DOI: 10.25635/2313–1586.2018.04.082.
- Hoek E. Prediction of hazards in underground excavations // IFAC Proceedings Volumes. - 1985. - V. 18. - № 6. - P. 1-5.
- Казикаев Д.М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
- 16. Далатказин Т.Ш. Исследование минерального состава глинистых отложений коры выветривания при выполнении геодинамической диагностики для обеспечения безопасности объектов

недропользования. // Проблемы недропользования. - 2018. - № 3. - С. 39-43. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.039.

- Ведерников А.С. Уточнение сейсмичности месторождений в «асейсмичном» районе республики Казахстан // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4. – С. 23–28. DOI: 10.25635/2313–1586.2018.04.023
- 18. Особенности напряженного состояния горного массива Соколовского железорудного месторождения / А.Е. Балек, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова, Д.Е. Мельник // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: Междунар. научно-техн. конф. Екатеринбург, 2018. Отв. за вып. Н.Г. Валиев. Екатеринбург: УГГУ, 2018. С. 256–265.
- Учет специфики комбинированной разработки рудных месторождений при натурных замерах напряженного состояния породного массива / А.Е. Балек, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова, Д.Е. Мельник // Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 20–27. DOI: 10.17580/gzh.2018.04.04.
- Ефремов Е.Ю. Обоснование критерия завершения процесса воронкообразования // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2018. – № 4. – С. 12–22.
- Пургина Д.В., Кузеванов К.И. Водопритоки в подземные горные выработки под влиянием внешних граничных условий при разработке угольных месторождений (на примере шахты Алексиевская) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 4. С. 79–96.
- 22. Гидрогеологические условия нарыкско-осташкинской площади Ерунаковского района Кузбасса / Е.В. Домрочева, К.И. Кузеванов, А.Г. Гридасов, Д.А. Сизиков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 134–142.

Поступила 04.10.2019 г.

Информация об авторах

Ефремов Е.Ю., научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.

UDC 622.834; 622.847

CHARACTERISTIC OF MUD INRUSHES DISTRIBUTION FROM CAVED ZONE INTO DEPOSIT LOCATED UNDER SEDIMENTARY STRUCTURE

Evgeniy Yu. Efremov,

Efremov-eu@mail.ru

Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58, Mamin-Sibiryak street, Yekaterinburg, 620219, Russia.

The relevance of research. Water and mud inrushes into underground working pose a serious threat for underground mining. There was a series of mud inrushes at «Sokolovskaya» mine over the past two decades. The largest of them led to the death of two miners. Recovery of the mine took several months.

The aim of the research is identification of inrushes distribution pattern to reduce the risk of mud inrush into the mine workings under overlying aguifers.

Methods. Analysis of mud inrushes includes identification of spatial and temporal distribution of the accidents occurred from 2003 to 2018; consideration of the mechanism of accumulation and transfer of mud masses from overlying aquifers into mine workings through caved zone and determination of factors affecting the volume of inrushes; geostatistical analysis of aquifer parameters; comparison of aquifer parameters and distribution of inrushes.

Results. The main part of the large inrushes occurred in lower levels under central and north caved zones. They usually occurred during the initial stage of ore body extracting on the lowest level. Further frequency and volume of the inrushes are reduced. A necessary condition for formation of large-scale inrush is high water cut of caved zone. Sources of high water cut of the northern and central caved zones are high water level areas of the Cretaceous aquifer to the north and west of the deposit. The main way to reduce the risk of mud inrush is the targeted drainage of the rock mass around the mine in the Cretaceous aquifer high water level areas.

Key words:

Funnel of caved zone, caved zone, water inflow, mud inrush, clay minerals, flooding.

REFERENCIES

- Szwedzicki T. Geotechnical precursors to large-scale ground collapse in mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mi*ning Sciences, 2001, vol. 38, no. 7, pp. 957–965.
- Brady B.H.G., Brown E.T. Rock mechanics: for underground mining. Dordrecht, Springer Science & Business Media, 2007. 628 p.
- Sun W., Zhou W., Jiao J. Hydrogeological classification and water inrush accidents in China's coal mines. *Mine Water and the Environment*, 2016, vol. 35, no. 2, pp 214-220. Available at: doi.org/10.1007/s10230-015-0363-3.
- Seymour C. Mining disasters What lessons can be learnt. Conference paper: Queensland Mine Safety Conference. 2005. pp.19-31 http://www.qldminingsafety.org.au/_dbase_upl/SafeConf05.pdf (accessed 28 September 2019).
- 5. Vutukuri V.S., Singh R.N. Mine Inundation-Case Histories. *Mine water and the environment*, 1995, vol. 14, pp. 107–130.
- Job B. Inrushes at British collieries: 1851 to 1970. Colliery Guardian, 1987, vol. 235, no. 5, pp. 192–201.
- Pelikh S.G., Rodimov V.V., Borziak V.E., Shapovalov V.P. Analiz inzhenernykh resheniy pri spasenii ludey na shakhte «Zapad-naya-Kapitalnaya» OOO «Rostov-Ugol» vo vremya avariy 23.10.03 [Analysis of engineer solution when saving people during «Rosstovugol» «Zapadnaya-Kapitalnaya» mine disaster]. Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten, 2005, no. 2, pp. 191–193.
- Trifonova P. «Alrosa» nachnet vosstanavlivat rudnik «Mir» v 2020 godu [«Alrosa» will begin recovery of «Mir» mine in 2020]. *Vedomosti.* 27 April 2018. Available at: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2018/04/27/768142-alrosa-nachnet (accessed 28 September 2019).
- Bringemeier D. Inrush and mine inundation a real threat to Australian coal mines? International Mine Water Association Annual Conference. Bunbury, Australia, 2012 Available at: https://www.researchgate.net/publication/281593908_Inrush_and_mine_inundation_-A_real_threat_to_Australian_coal mines (accessed 28 September 2019).

- Yang W., Xia X., Zhao G., Ji Y., Shen D. Overburden failure and the prevention of water and sand inrush during coal mining under thin bedrock. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, vol. 21, no. 5, pp. 733-736.
- Zhou W., Li G. Impact of karst water on coal mining in North China. *Environmental Geology*, 2006, vol. 49, no. 3, pp. 449–457. DOI: 10.1007/s00254-005-0102-3
- Dubinin N.G., Khramtsov V.F., Shekhovtsov V.S. Predotvrashenie proryvov glinistykh porod pri razrabotke rudnykh mestorogdeniy [Mud inrush prevention on ore mines]. Novosibirsk, IGD SO USSR Publ., 1989. 124 p.
- Usanov S.V., Krutikov A.V., Melnik D.E. Ensuring of industrial safety when developing sokolovskiy iron-ore deposit by underground method in terms of flooded overlapping strata. *Ploblems of mining*, 2018, no. 4, pp. 82–89, DOI: 10.25635/2313–1586.2018.04.082. In Rus.
- Hoek E. Prediction of hazards in underground excavations. *IFAC Proceedings Volumes*, 1985, vol. 18, no. 6, pp. 1–5
- Kazikaev D.M. Geomekhanicheskie protsessy pri sovmestnoy i povtornoy podrabotke [Geomechanical processes during combined and second mining]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 288 p.
- Dalatkazin T.S. Research of the mineral composition of clayey deposits of the weathering crust during geodynamic diagnostics for ensuring the safety of subsoil use objects. *Problems of mining*, 2018, no. 3, pp. 39–43. In Rus. DOI: 10.25635/2313–1586.2018.03.039.
- Vedernikov A.S. Deposits seismicity study of a «nonseismic» region of the Kazakhstan. *Problems of mining*, 2018, no. 4, pp. 23-28. In Rus. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.023.
- Balek A.E., Panzhin A.A., Konovalova Yu.P., Melnik D.E. Osobennosti napryazhenogo sostoyaniya gornogo massiva Sokolovskogo zhelezorudnogo mestorogdeniya [Paricular properties of rock stress conditions of Sokolovskoe ore deposit]. Innovatsionnnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeny. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya [Conference paper: Innovation technology for extraction of ore and industrial minerals]. Yekaterinburg, 2018. pp. 256–265.
- 19. Balek A.E., Panzhin A.A., Konovalova Yu.P., Melnik D.E. In-situ stress measurement in rocks, considering specificity of hybrid

mining. Mining journal, 2018, no. 4, pp. 20-27. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2018.04.04.

- Efremov E. Y. Rationale of cave-in process consummation criterion. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2018, no. 4, pp. 12–22. In Rus.
 Purgina D.V., Kuzevanov K.I. Water inflow into mine under the
- Purgina D.V., Kuzevanov K.I. Water inflow into mine under the influence of external boundary conditions at coal deposit exploitation (Kuzbass). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 79–96. In Rus.
- Domrocheva E.V., Kuzevanov K.I., Gridasov A.G., Sizikov D.A. Hydrogeological conditions of naryksko-ostashkin area in Eunakovo region in Kuzbass. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 134-142. In Rus.

Received: 4 October 2019.

Information about the authors

Evgeniy Yu. Efremov, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.24

ВЛИЯНИЕ КРУТИЛЬНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СКОРОСТЬ БУРЕНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОМОК РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ РDC

Третьяк Александр Александрович¹,

13050465@mail.ru

Литкевич Юрий Федорович¹,

13050465@mail.ru

Борисов Константин Андреевич¹,

13020165@mail.ru

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность. В настоящее время для сооружения скважин на нефть и газ наиболее эффективным инструментом являются долота, армированные пластинами PDC (polycrystalline diamond cutters). Такие долота работают по принципу резания-скалывания, так как из всех механизмов разрушения породы резание является наиболее эффективным по причине того, что прочность породы на растяжение и скол значительно меньше её прочности на сжатие. Анализ состояния отработанных буровых долот, армированных пластинами PDC, показывает, что они отрабатывают свой ресурс не полностью, так как часть режущих PDC элементов выходит из строя по причине скола. Многообразие форм сколов по форме и размерам требует провести классификацию, выявить причину появления и определить нагрузки, приводящие к их возникновению. Кроме того, слом пластин или их потеря в значительной степени сказываются на конечных технико-экономических показателях бурения разведочных и эксплуатационных скважин. Решение вопросов повышения качества долот путем уменьшения числа поломок будет способствовать повышению экономической эффективности работ при добыче и разведке полезных ископаемых.

Целью исследования является определение размеров площадок скола пластин PDC для дальнейшей классификации в зависимости от толщины срезаемого слоя породы, причин возникновения крутильных и продольных колебаний в бурильной колонне, вызывающих поломки PDC, а также разработка конструкции бурового долота, армированного пластинами PDC, предупреждающего появление автоколебаний в бурильной колонне.

Объекты: режущие элементы буровых долот, армированных пластинами PDC с плоской передней гранью и PDC с выпуклой передней гранью, сколы пластин PDC на буровых долотах, возникающие в процессе бурения скважин.

Методы: экспериментально-аналитический метод исследования на лабораторных образцах и на отработанных буровых долотах, армированных пластинами PDC.

Результаты. На основании анализа и обобщения результатов выполненных лабораторных исследований причин возникновения поломок пластин PDC и их характера разработан ряд технических и технологических решений, предупреждающих возникновение крутильных и продольных автоколебаний в бурильной колонне и повышающих эффективность породоразрушающего инструмента, армированного пластинами PDC.

Ключевые слова:

Лабораторные исследования, отработанные буровые долота, поломки PDC, крутильные колебания, скол от действия сил по передней грани, скол от действия сил по задней грани, крутильная волна, продольная волна, энергия неупругого удара, разведка полезных ископаемых.

Введение

Бурение скважин на нефть и газ в комплексе работ при геологоразведке выходит на первое место как по стоимости работ, так и по качеству и количеству геологической информации, получаемой в ходе их проведения. Эффективность процесса бурения скважин, особенно в твердых породах, в значительной степени определяется эксплуатационными показателями породоразрушающего инструмента.

В настоящее время наиболее эффективными являются долота, армированные PDC (polycrystalline diamond cutters), которые при бурении по породам до IX категории по буримости обеспечивают увеличение проходки в 1,5–2 раза по сравнению с трехшарошечными долотами в одинаковых геолого-технологических условиях [1–5].

Наработка буровых долот, армированных PDC, зависит от износа и поломок режущих элементов. На каждом из отработанных долот количество изношенных и поломанных режущих элементов примерно одинаково. Анализ состояния отработанных долот показывает, что поломки PDC имеют преимущественно два вида: а) сколы от действия сил со стороны передней грани, б) сколы от действия сил со стороны задней грани, также встречаются отрывы пластин. На рис. 1 показаны основные виды поломок. Размеры сколов можно характеризовать площадью поверхности сколов S_{ck} , мм². На рис. 2 показаны PDC до и после образования скола в лабораторных условиях.

Задача

Анализ имеющихся экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях [6–8] и на отработанных долотах, показал, что все многообразие поломок можно разделить на группы в зависимости от их размеров и площади скола (S_{ex}): 1) мелкие сколы; 2) средние сколы; 3) крупные сколы. Площади сколов ΣS можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC.



Рис. 1. Основные виды поломок пластин PDC (слева направо): сколы от действия сил со стороны передней грани; сколы от действия сил со стороны задней грани; отрыв пластины

Fig. 1. Main types of damages to the PDC plates (from left to right): breakdown from the action of forces from the front face; breakdown from the action of forces from the rear face; plate detachment



Рис. 2. Элемент долота с пластиной РDС до и после образования площадки скола S_{ск}, в процессе лабораторных исследований

Fig. 2. Bit element with PDC plate before and after the formation of S_{ex} breakdown area, in the laboratory research

Прочностные характеристики режущих элементов значительно превышают прочностные характеристики буримых пород. Так, у твердосплавной основы PDC твердость 96–91 HRA, прочность на изгиб – до 1800 МПа, а у алмазного слоя предел прочности при сжатии – 2000 МПа. Следовательно, поломки могут происходить только от действия ударных нагрузок.

Изменения по величине сил резания и крутящего момента на долоте приводит к возникновению крутильных колебаний на буровой колонне. Исследованиями [9, 10], проводимыми при бурении скважин глубиной 1800 м бурильной колонной из труб Ø127 мм долотом БИТ2 Ø214 мм при крутящем моменте на долоте 9кН-м и частоте вращения, равной 120 об/мин, установили, что буровая колонна закручивается на 5,6 оборота, а при уменьшении крутящего момента до 6 кН·м раскручивается на два оборота. Такое изменение углов закручивания бурильной колонны запускает процесс крутильных автоколебаний. Их период *T*, определяемый по формуле (1), составит 3 секунды, а число колебаний v, определяемое по формуле (2), будет равно 20 колеб/мин.

$$T = \frac{4l}{\lambda} \,\,\mathrm{c},\tag{1}$$

$$v = \frac{15\lambda}{l}$$
 колеб/мин, (2)

где l=1800 м — длина бурильной колонны; $\lambda=2465$ м/с — скорость распространения крутильных возмущений.

Это значит, что каждые 3 секунды на долото будет воздействовать один ударный импульс от автоколебаний. И хотя вероятность образования разрушающего удара на PDC не высока (менее 20 %), $P \leq 0,2$, анализ причин выхода из строя отработанных долот показывает, что число поломок и нормально изношенных PDC на долоте примерно одинаково.

Так, по данным [11], при бурении скважины глубиной 1560 м по крепким породам VIII категории буримости с P_{μ} =960 МПа долотом Ø215,9 мм и с лопастями, вооруженными 56 пластинами PDC, средняя скорость бурения составляла 10,5 м/ч.

При этом на отработанных долотах более 15 % режущих элементов PDC имели поломки различных видов. Это значит, что решение задачи по уменьшению крутильных колебаний, приводящих к возникновению поломок PDC, является актуальной.

Кроме того, крутильные колебания опасны еще и тем, что они порождают развитие сильных продольных колебаний [12–15]. Колебания этого рода вызывают поломки породоразрушающего инструмента от действия сил по задней грани [16, 17].

Условием резонанса продольных автоколебаний, вызванных крутильными, будет равенство собственных частот крутильных ($W_{\rm R}$) и продольных ($W_{\rm R}$) колебаний, т. е. должно соблюдаться условие:

$$W_{\rm K} = W_{\rm m}$$

Для образования продольных автоколебаний, возникающих в результате крутильных, необходима строгая синхронизация собственных крутильных и продольных частот породоразрушающего инструмента, то есть частота продольных резонансных колебаний $v_{\rm pes}$ равна продольной круговой частоте $W_{\rm к.pes}$, поделенной на 2π . В результате этого получаем:

$$v_{\rm pes} = \frac{W_{\rm \kappa, pes}}{\lambda \pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{k \lambda \pi}{2l_{\rm pes}},\tag{3}$$

где v_{pes} – частота продольных резонансных колебаний; l_{pes} – резонансная длина колонны; k=1,2,3 – числа натурального ряда.

Продольные автоколебания могут начинаться только лишь с некоторой определенной глубины скважины. Причем частота продольных автоколебаний $v_{\rm pes}$, начиная от максимального значения при глубине примерно 40 м, убывает до минимального – 25 Гц, с увеличением длины бурильной ко-

лонны l_{pes} . По данным [18–20], расчёты взаимосвязи резонансных длин l_{pes} и частот v_{pes} бурильной колонны в случае продольных автоколебаний, выполненных по формуле (3), представлены графически на рис. 3.



Puc. 3. График взаимосвязи резонансных длин и частот бурильной колонны в случае продольных автоколебаний



Из графика видно, что с увеличением глубины скважины $l_{\rm pes}$ частота продольных автоколебаний $v_{\rm pes}$ уменьшается.

В моменты наступления равенства частот крутильных и продольных колебаний возникают предпосылки для их совместного воздействия на заднюю поверхность режущих пластин PDC, приводящих к образованию сколов по задней грани.

Решение

Анализ имеющихся экспериментальных данных на обработанных долотах показал, что все многообразие поломок можно разделить на группы в зависимости от их размеров и площади скола $S_{\rm ex}$, мм²:

- 1) мелкие сколы, где $S_{\text{м.ск}} \approx 9-18 \text{ мм}^2$. К этой группе относятся около 60 % всех поломок (58-60 %);
- средние сколы, S_{ср.ск}≈19-30 мм². В этой группе находятся около 30 % поломок (27-30 %);
- крупные сколы, S_{кр.ск}≈31-42 мм². К ним относятся примерно 10 % поломок (10-12 %).

На рис. 4 показана схема образования сколов при различных значениях B (мм), h (мм) и S (мм²) для пластин PDC радиусом R=7,75 мм. В таблице приведено разделение сколов по группам в зависимости от S. Площадь сколов ΣS можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC. Тогда, например, зная процент поломок, можно рассчитать вероятную скорость бурения.

Таблица.Разделение сколов по группамTable.Split breakdowns into groups

-				
	$B = 2\sqrt{2Rh - h^2}$		R=	=7,75
Группа/Group	Ι	II 1,0-1,5 5,49-8,48 19-30		III
h_i	0,2-0,5			2,0-2,5
B_i	3,2-5,48			8,48-10,5
S	9-18			31-47



Рис. 4. Схема образования сколов при различных значениях В и h

Fig. 4. Scheme of formation of breakdowns at different values of B and h

Пусть долото диаметром 215 мм, вооруженное 56 пластинами PDC, бурило породу VIII категории буримости ($P_{\rm g}$ =920 МПа) при осевой нагрузке $P_{\rm oc}$ =200 кН, при этом на режущих PDC образовалось 15 % сколов.

1. Определяем, сколько образовалось сколов на 56 пластинах

$$n = \frac{56 \times 15}{100} = 9$$
 сколов.

Из них крупных сколов – 10 %; n_к=1 скол с общей площадью:

$$\sum S_{\kappa} = n_{\kappa} S_{\kappa} = 36 \text{ mm}^2,$$

где $S_{\kappa} = \frac{31+42}{2} = 36 \text{ мм}^2 - средний размер площа-$

ди крупного скола.

Средних сколов – 30 %; n_{ср}=2,5 сколов с общей площадью:

$$\sum S_{\rm cp} = 2,5 \times 25 = 62 \, \text{mm}^2,$$

где $S_{\rm cp} = \frac{19+30}{2} = 25$ мм² – средний размер площа-

ди среднего скола.

4. Мелких сколов – 60 %, *n*_м=5 сколов с общей площадью:

$$\sum S_{\rm m} = 5 \times 13, 5 = 68 \, {\rm Mm}^2,$$

где
$$S_{_{\rm M}} = \frac{9+18}{2} = 13,5$$
 мм² – средний размер площа-

ди мелкого скола.

5. Общая площадь сколов

$$\sum S_{\rm ck} = 68 + 62 + 36 = 166$$
 mm².

Известно, что на отработанных долотах количество изношенных и поломанных режущих элементов примерно одинаково, тогда суммарная площадь затупления:

$$\sum F_{\rm 3at} = \lambda \sum S_{\rm ck} = 332 \text{ mm}^2.$$

При этом удельная нагрузка на режущих PDC была

$$P_{\rm yg} = \frac{P_{\rm oc}}{\sum F_{\rm 3ar}} = \frac{200000}{332} = 602 \frac{H}{\rm mm^2} = 602 \text{ MHa},$$

где $P_{\circ C}$ =200 кH – осевая нагрузка на долото. Механическая скорость бурения при этом составила:

$$V_{\rm m6} = V_0 \frac{P_{\rm yg}}{P_{\rm rc}} = 4,7 \frac{602}{920} = 5,07 \frac{\rm MM}{\rm \tilde{n}} = 11 \ \rm m/r,$$

где V_0 =4,7 мм/с – модуль скорости для породы VIII категории буримости с $P_{\kappa} = 920$ МПа.

Полученные результаты показывают высокую сходимость расчетного метода ($V_{\rm m6}$ =11 м/ч) и экспериментального определения механической скорости бурения (V=10,3 м/ч) с учетом износа и поломок режущих элементов долот.

Преимущественное влияние крутильных и продольных колебания на образование сколов PDC по передней и задней грани подсказывает направление и поиск мероприятий по предупреждению поломок.

Для предупреждения возникновения крутильных колебаний необходимо бурильную колонну разгрузить от крутящего момента, передаваемого от ротора или ВЗД на буровое долото и оснастить режущие лопасти пластинами PDC с выпуклой передней гранью, способными ограничивать глубину внедрения резцов и гасить продольные колебания.

Для предупреждения возникновения крутильных колебаний и уменьшения износа периферийных режущих элементов на кафедре НТиТ (Нефтегазовые техника и технологии) ЮРГПУ (НПИ) было разработано двухъярусное долото со встречным вращением ярусов (патент РФ № 2445433).

При бурении скважин со сложным чередованием песчаников, алевролитов, с глинистыми прослоями, при переходах от крепких пород к мягким происходит резкое увеличение толщины срезаемого слоя и увеличение нагрузки, действующей на переднюю грань PDC (способную вызвать крутильные и продольные колебания в бурильной колонне).

Для предупреждения резкого внедрения долота в породу целесообразно оснащать лопасти долота пластинами PDC с выпуклой передней гранью.

На рис. 5 показана схема взаимодействия PDC с выпуклой и плоской передней гранью с породой.

Так, при бурении породы VIII категории с $P_{v}=920 \text{ мм}^{2} \text{ с толщиной срезаемого слоя } h=1 \text{ мм}$ при осевой нагрузке 4780 Н на PDC диаметром 13,5 мм при переходе на породу VI категории с *P*_к=650 МПа режущий элемент войдет в породу на глубину *h*=4,5 мм. При этом произойдет резкое увеличение усилий резания, а следовательно, и крутящего момента на долоте.



- Рис. 5. Схема расположения пластин РDС на лопасти долота: I – вид спереди пластин: 1 – с плоской; 2 – с выпуклой передней гранью; II – вид сбоку пластин: 1 – с плоской; 2 – с выпуклой передней гранью
- Fig. 5. Layout of the PDC plates on the bit blade: I front view of plates: 1 - with flat; 2 - with convex front face; II - side view of plates: 1 – with flat; 2 – with convex front face

При установке на режущей лопасти пластин PDC с выпуклой передней гранью в виде круглого конуса с основанием Ø11 мм, имеющего максимальную площадь контакта с породой $F_2 = 80$ мм², появляется возможность погасить на породе с *P*_к=650 МПа осевую нагрузку 52 кН (5200 кг).



Рис. 6. Пример армирования лопасти долота пластинами PDC: 1 – лопасть, 2 – PDC с плоской передней гранью; 3 – PDC с выпуклой передней гранью

Fig. 6. Example of blade bit reinforcement with PDC plates: 1 is the blade, 2 is the PDC with flat front face; 3 is the PDC with convex front face

Тогда при переходе от породы с *P_к*=920 МПа на породу с Р_и=650 МПа режущий элемент, срезающий на крепкой породе слой толщиной 1 мм, в мягкую породу войдет всего на 1,5 мм, т. к. основную часть осевой нагрузки на PDC, равной 4780 кH, примет на себя выпуклая передняя грань круглого конуса.

По результатам выполненных исследований подана заявка на «Двухъярусное долото со встречным вращением ярусов, режущие лопасти которых оснащены пластинами PDC с плоской и выпуклой передними гранями, предупреждающими возникновение крутильных и продольных автоколебаний в бурильной колонне». На рис. 6 показан общий вид долота и пример армированных режущих лопастей – 1 долота пластинами PDC с плоской – 2 и выпуклой – 3 передними гранями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 191–195.
- Hossain M.E., Al-Majed A.A. Fundamentals of sustainable drilling engineering. – Salem, MA: Scrivener Publ., 2015. – 754 p. DOI: 10.1002/9781119100300.
- Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е. Разработка методики расчёта наработки породоразрушающего инструмента с алмазнотвердосплавным вооружением // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 12. – С. 2–5.
- Soares C., Daigle H., Gray K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients // Journal of Natural Gas Science and Engineering. - 2016. - V. 34. -P. 1225-1236. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.08.012.
- Буровой породоразрушающий инструмент / В.И. Балаба, И.К. Бикбулатов, Г.И. Вышегородцева, Э.С. Гинзбург, В.Я. Кершенбаум, А.С. Оганов. – М.: Изд-во РГУ нефти и газа, 2013. – 251 с.
- Лабораторные исследования поломок режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами / А.А. Третьяк, Ю.Ф. Литкевич, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2018. – № 7. – С. 50–54.
- Третьяк А.Я., Кузнецова А.В., Борисов К.А. Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 169–177.
- Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
- Вопияков В.А., Посташ С.А., Колесников П.И. Возникновение автоколебаний бурильной колонны – критерии износа шарошечных долот // Бурение. – 1974. – № 8. – С. 23–25.
- Симонов В.В., Юнин Е.К. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента. – М.: Недра, 1977. – 210 с.
- Власюк В.И., Будюков Ю.Е., Спирин В.И. Технические средства и технологии для повышения качества бурения скважин. – Тула: Гриф и К, 2013. – 176 с.

Выводы

- Для предупреждения возникновения крутильных колебаний необходимо бурильную колонну разгрузить от крутящего момента, передаваемого от ротора или винтового забойного двигателя на буровое долото, и оснастить режущие лопасти пластинами PDC с выпуклой передней гранью.
- 2. Площадь сколов ΣS можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC.
- 3. По результатам выполненных исследований подана заявка на «Двухъярусное долото со встречным вращением ярусов, режущие лопасти которых оснащены пластинами PDC с плоской и выпуклой передними гранями».
- Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьев, В.Ф. Чихоткин, Р.К. Богданов, А.П. Закора. – М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1997. – 329 с.
- A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations / Y. Zhao, A. Noorbakhsh, M. Koopialipoor, A. Azizi, M.M. Tahir // Engineering with Computers. – 2019. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007 % 2Fs00366-019-00715-2.pdf (дата обращения 11.10.2019). DOI: 10.1007/s00366-019-00715-2.
- Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2011. № 1 (38). С. 151–157.
- A new method of combined rock drilling / T. Jiren, L. Yiyu, G. Zhaolong, X. Binwei, S. Huijuan et al. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2014. – V. 24. – Iss. 1. – P. 1–6.
- 16. Влияние угла установки резца PDC лопастного долота на механическую скорость бурения скважин в перемежающихся по твердости горных породах / Ю.А. Арсентьев, Н.В. Соловьев, А.П. Назаров, А.М. Лимитовский // Горный журнал. 2018. № 11. С. 47–50.
- Теоретический метод обоснования конструктивных параметров долот режуще-скалывающего действия / Н.В. Соловьев, Ю.А. Арсентьев, Т.Х. Нгуен, Х.Н. Курбанов // Инженер-нефтяник. 2015. № 3. С. 16–24.
- Соловьев Н.В., Бейкель В.А. Состояние и пути повышения эффективности техники и технологии бурения скважин при выполнении геологоразведочных работ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2013. № 1. С. 50–56.
- Нескоромных В.В. Результаты экспериментальных исследований буримости анизотропной горной породы // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2013. № 6. С. 81–85.
- Navarro-Lopez E.M., Cortes D. Avoiding harmful oscillations in a drillstring through dynamical analysis // Journal of Sound and Vibration. - 2007. - V. 307. - № 1-2. - P. 152-171.

Поступила 15.10.2019 г.

Информация об авторах

Третьяк А.А., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовой техники и технологии Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Литкевич Ю.Ф., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазовой техники и технологии Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Борисов К.А., ассистент кафедры нефтегазовой техники и технологии Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

UDC 622.24

INFLUENCE OF TORSIONAL AND LONGITUDINAL VIBRATIONS ON DRILLING SPEED AND FORMATION OF BREAKDOWNS OF CUTTING ELEMENTS OF PDC-REINFORCED DRILL BITS

Alexander A. Tretyak¹,

13050465@mail.ru

Yuriy F. Litkevich¹,

13050465@mail.ru

Konstantin A. Borisov¹,

13020165@mail.ru

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),

132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

The relevance. Currently, for construction of oil and gas wells, the most effective tool are bits reinforced with PDC (polycrystalline diamond cutters). These bits work on cutting-chipping principle, as the cutting is the most effective among all the mechanisms of rock destruction, due to the fact that the tensile strength of the rock and chipping is much less than its compressive strength. The analysis of the state of spent drill bits reinforced with PDC plates shows that they work out their life not fully, as a part of the cutting PDC elements fails due to chipping. The variety of forms of chips in shape and size requires classification, identification of the reasons of occurrence and determination of loads that lead to their occurrence. In addition, the scrapping of plates or their loss significantly affects the final technical and economic performance of drilling exploration and production wells. Solving the issues of improving the quality of bits by reducing the number of breakdowns will help to improve the economic efficiency of work in extraction and exploration of minerals.

The aim of the study is the sizing platform chips for possible classification depending on the thickness of the shear layer of rock cutting element, and determining the causes of torsional and longitudinal vibrations in the drill string, causing breakage of the PDC offered a constructive change of drill bits reinforced PDC plates, warning the appearance of self-oscillations in the drill string.

Objects: cutting elements of drill bits reinforced with PDC plates with a flat front face and PDC with a convex front face, chips of PDC plates on drill bits arising during drilling.

Methods: experimental and analytical method of research on laboratory samples and on spent drill bits reinforced with PDC plates. **Result**. Based on the analysis and generalization of the results of the laboratory studies of the PDC plate breakdown occurrence causes and their nature the authors have developed the number of technical and technological solutions that prevent the occurrence of torsional and longitudinal self-oscillations in the drill string, and increase the efficiency of rock-cutting tools reinforced with PDC plates.

Key words:

Laboratory research, waste drill bits, PDC breakdowns, torsional vibrations, breakdown from the action of forces on the front face, breakdown from the action of forces on the back face, torsional wave, longitudinal wave, energy of inelastic impact, mineral exploration.

REFERENCES

- Neskoromnykh V.V., Borisov K.I. Analytical study of cutting process-splitting rock bit with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 191–195. In Rus.
- Hossain M.E., Al-Majed A.A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering. Salem, MA, Scrivener Publ., 2015. 754 p. DOI: 10.1002/9781119100300.
- Tretyak A.A., Litkevich Yu.F., Aseeva A.E. Razrabotka metodiki rascheta narabotki porodorazrushayushchego instrumenta s almazno-tverdosplavnym vooruzheniem [Development of methods for calculating the operating time of rock-cutting tools with diamond-carbide weapons]. Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more, 2010, no. 12, pp. 2-5.
- Soares C., Daigle H., Gray K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 1225–1236. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.08.012.
- Balaba V.I., Bikbulatov I.K., Vyshegorodtseva G.I., Ginzburg E.S., Kershenbaum V.Ya., Oganov A.S. Burovoy porodorazrushayushchiy instrument [Drilling rock cutting tools]. Moscow, National University of Oil and Gas Publ., 2013. 251 p.
- Tretyak A.A., Litkevich Yu.F., Grossu A.N., Borisov K.A. Laboratornye issledovaniya polomok rezhushchikh elementov burovykh dolot, armirovannykh almazno-tverdosplavnymi plastinami [Laboratory studies of breakdowns of cutting elements of drill

bits reinforced with diamond-carbide plates]. *Delovoy zhurnal* Neftegaz.ru, 2018, no. 7, pp. 50-54.

- Tretyak A.Ya., Kuznetsova A.V., Borisov K.A. Determination of PDC cutter breakdowns using regression and neural network modeling. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 169–177. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to designing highly efficient rock-breaking tool. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
- Vopiyakov V.A., Postash S.A., Kolesnikov P.I. Vozniknovenie avtokolebaniy burilnoy kolonny – kriterii iznosa sharoshechnykh dolot [Occurrence of self-oscillations of the drill string – criteria for wear of roller bits]. *Burenie*, 1974, no. 8, pp. 23–25.
- Simonov V.V., Yunin E.K. Vliyanie kolebatelnykh protsessov na rabotu burilnogo instrumenta [Oscillatory processes influence on drilling tool operation]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 210 p.
- Vlasyuk V.I., Budyukov Yu.E., Spirin V.I. Tekhnicheskie sredstva i tekhnologii dlya povysheniya kachestva bureniya skvazhin [Technical means and technologies to improve the quality of drilling]. Tula, Grif i K Publ., 2013. 176 p.
- Solovev N.V., Chikhotkin V.F., Bogdanov R.K., Zakora A.P. Resursosberegayushchaya tekhnologiya almaznogo bureniya v slozhnykh geologicheskikh usloviyakh [Resource-saving technology of diamond drilling in difficult geological conditions]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1997. 329 p.

- Zhao Y., Noorbakhsh A., Koopialipoor M., Azizi A., Tahir M.M. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations. *Engineering with Computers*, 2019. Available at: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007 % 2Fs00366-019-00715-2.pdf (accessed 11 October 2019). DOI: 10.1007/s00366-019-00715-2.
- Neskoromnyh V.V., Pushmin P.S. Methods to determine optimum parameters of the mode and conditions of borehole drilling. *Proceedings of the Siberian branch of the section of Earth Sciences RAEN*, 2011, no. 1, pp. 151–157. In Rus.
- Jiren T., Yiyu L., Zhaolong G., Binwei X., Huijuan S. A new method of combined rock drilling. *International Journal of Mi*ning Science and Technology, 2014, vol. 24, Iss. 1, pp. 1–6.
- Arsentiev Yu.A., Soloviev N.V., Nazarov A.P., Limitovsky A.M. Effect of PDC cutter rake on penetration rate of wing bit drilling in variable hardness rocks. *Gorny zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 47-50. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.08

- Solovev N.V., Arsentev Yu.A., Nguen T.X., Kurbanov X.N. Thinking of parameters for cutting-shearing type drilling bit design. *Inzhener-neftyanik*, 2015, no. 3, pp. 16–24.
- Solovev N.V., Beikel V.A. Statement and ways to increase the efficiency of drilling techniques and technologies in geological exploration works. *Proceedings of Higher Schools, Geology and Exploration*, 2013, no. 1, pp. 50–56. In Rus.
- Neskoromnykh V.V. Results of the pilot studies of drilling capacity of anisotropic rock. *Proceedings of Higher Schools, Geology* and Exploration, 2013, no. 6, pp. 81–85. In Rus.
- Navarro-Lopez E.M., Cortes D. Avoiding harmful oscillations in a drillstring through dynamical analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, vol. 307, no. 1–2, pp. 152–171.

Received: 15 October 2019.

Information about the authors

Alexander A. Tretyak, Dr. Sc., associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).
Yuriy F. Litkevich, Cand Sc., associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).
Konstantin A. Borisov, assistant, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

УДК 621.314.58:681.5.015

СОЛИТОННОЕ РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ, СНАБЖАЮЩИХ НЕФТЯНЫЕ И ГАЗОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исаев Юсуп Ниязбекович¹,

isaev_yusup@mail.ru

Колчанова Вероника Андреевна¹,

ni105@mail.ru

Кулешова Елена Олеговна¹,

kuleshova@tpu.ru

Филипас Александр Александрович¹,

filipas@tpu.ru

1 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Бесперебойное электроснабжение нефтяных и газовых месторождений остается важнейшей задачей мировой экономики. Одним из важнейших факторов, влияющих на отключение электроснабжения месторождений, является нарушение устойчивой работы генераторов. Устойчивая работа генераторов может быть нарушена при возникновении переходных процессов, вызванных короткими замыканиями или импульсными воздействиями на линии электропередач. При этом в электроэнергетической системе могут возникнуть уединенные волны – солитоны, характеризующиеся большой амплитудой и высокой скоростью распространения волны. В данной работе описываются причины возникновения таких волн. Приводится решение волнового уравнения электромеханической системы электроэнергетики, описывающего распространение уединенных волн. Решение рассматривается в фазовой плоскости, приводится численный пример расчета солитонного решения.

Цель: найти солитонные решения в переходных процессах электромеханических систем и объяснить причины их возникновения, дать объяснения этого физического явления, определить, какую роль это явление играет в оценке устойчивости работы генераторов и предложить мероприятия по устранению нарушения устойчивости при наличии солитонной волны.

Методы: метод фазовой плоскости, численное решение дифференциального уравнения методом Рунге- Кутта, метод пространства состояния.

Результаты. Обнаружено, что при приближении решения уравнения турбина – генератор к границе динамической устойчивости возникают солитоны – одиночные всплески величины угла генератора.

Выводы. При распространении эти волны ведут себя как частицы, что позволяет производить анализ обмена энергиями (потоками мощности) так же как анализ обмена энергиями механических частиц. При нарушении устойчивости возникают гармонические колебания, которые преобразуются в группу солитонов, распространение которых можно рассматривать как распространение частиц.

Ключевые слова:

Всплеск волны, солитон, электромеханические переходные процессы, динамическая система, фазовое пространство.

Введение

На сегодняшний день добыча нефти и газа требует мощных источников электроэнергии. Большую часть электроэнергии нефтегазодобывающие предприятия получают из распределительных сетей электроэнергетических компаний. При этом доля собственной генерации составляет около 30 % от общего потребления электроэнергии на добывающих предприятиях. Потребители электрической энергии относятся к потребителям первой и второй категории питания, т. е. требуют бесперебойного питания [1, 2]. Одной из важнейших задач электроснабжения нефтегазовых предприятий является обеспечение устойчивой работы генераторов [3]. Нарушение устойчивой работы генератора может повлечь за собой его аварийное отключение, вывод из работы дорогого оборудования, простой в работе, аварии на добывающих предприятиях [4]. Решению данной задачи посвящено много работ. Одной из мало изученных причин возникновения неустойчивой работы генератора является возникновение уединенной волны – солитона [5-7].

При описании переходных процессов, происходящих в электромеханической системе, и исследовании динамической устойчивости используется нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее агрегат турбина-генератор.



Рис. 1. Угловая характеристика активной мощности генератора, на графике показаны точка положения равновесия δ₀ и критическая точка δ_{xm}

Fig. 1. Angular characteristic of the generator active power, the graph shows the equilibrium point δ_0 and the critical point δ_{sp}

$$T_{J}\frac{d\omega}{dt}=P_{\dot{O}}-P_{m}\sin(\delta_{0}+\Delta\delta),$$

или

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{\dot{O}} - P_m \sin(\delta_0 + \Delta \delta).$$
(1)

Здесь T_{J} – механическая постоянная генератора; $\Delta \omega$ – отклонение частоты энергосистемы от положения равновесия; $P_{\rm T}$ – активная мощность турбины (рис. 1); $P_m \sin(\delta)$ – активная мощность генератора. Это уравнение описывает колебания угла ротора генератора δ . Отклонение угла $\Delta\delta$ от его положения равновесия δ_0 . При соблюдении баланса генерации и потребления энергии в системе, т. е. при равенстве активных мощностей турбины и генератора, отклонения частоты от положения равновесия не происходит (точка на графике δ_0 – устойчивая точка положения равновесия) и система работает при постоянной частоте. Возмущения, вызывающие существенные отклонения угла от устойчивой работы системы, могут быть вызваны как короткими замыканиями, так и другими типами аварий. При исследовании влияния генераторов друг на друга необходимо принимать во внимание распределенность системы, т. е. учитывать зависимость угла каждого генератора не только от времени t, но и от координаты x[8, 9]. В таком случае следует говорить не о колебательных процессах, а о волновых процессах.

Нелинейные волновые процессы, происходящие в электромеханических системах, имеют общность с волновыми процессами, происходящими в других областях, таких как гидродинамика [10, 11], учитывающая распространение волн в сплошных средах [12]. В частности, известно, что в ряде случаев на гребнях волны появляются осцилляции в виде всплесков, уединенных волн, называемых солитонами (solitary wave) [13, 14]. Решение нелинейных задач на основе солитонов является актуальным, что подтверждается работами многих авторов [15, 16]. Особенности солитонов заключаются в том, что при взаимодействии двух солитонных волн одинаковой амплитуды они напоминают процесс взаимодействия двух частиц одинаковой массы (частицеподобная волна), при котором частицы обмениваются скоростями распространения. При взаимодействии друг с другом или с некоторыми другими возмущениями солитоны не разрушаются, а продолжают движение, сохраняя свою структуру неизменной [13, 17].

В данной работе авторами предпринята попытка найти солитоны в переходных процессах электромеханических систем, объяснить причины их возникновения и дать объяснения этого физического явления, определить, какую роль это явление играет в оценке устойчивости и предложить мероприятия по устранению нарушения устойчивости при наличии солитонной волны.

Ограничимся рассмотрением стационарного случая, когда волновое уравнение в частных производных преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение типа (1) для уединенной энергосистемы [13, 18]. Анализ динамической системы будем производить с помощью фазовой плоскости δ , ω .

Перепишем уравнение (1) в виде системы уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_0 - P_m \sin(\delta)}{T_J}. \end{cases}$$
или
$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = f_1(\omega, \delta); \\ \frac{d\omega}{dt} = f_2(\omega, \delta). \end{cases}$$
 (2)

Опишем последовательность действий исследуемой системы:

Находим точки положения равновесия на фазовой плоскости, прировняв все производные нулю (установившийся процесс). Число корней может быть больше, чем порядок дифференциального уравнения, в отличие от линейной системы, где число корней строго соответствует порядку уравнений. В нашем случае мы имеем бесконечное количество корней вдоль оси углов, поэтому ограничимся рассмотрением корней уравнения (2) в первом полупериоде:

$$\begin{array}{c} 0 = f_1(\omega, \delta) \\ 0 = f_2(\omega, \delta) \end{array} \rightarrow \quad \omega = \omega_0, \ \delta = \delta_0, \ \omega = \omega_0, \ \delta = \delta_1. (3)$$

2. Раскладываем функции $f_1(\omega, \delta)$ и $f_2(\omega, \delta)$ в окрестности точки положения равновесия $\omega = \omega_0, \, \delta = \delta_0$:

$$\begin{cases} f_1(\omega,\delta) = f_1(\omega_0,\delta_0) + \frac{\partial f_1}{\partial \delta} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta \delta + \frac{\partial f_1}{\partial \omega} \Big|_{\omega=\omega_0} \Delta \omega + \dots \\ f_2(\omega,\delta) = f_2(\omega_0,\delta_0) + \frac{\partial f_2}{\partial \delta} \Big|_{\delta=\delta_0} \Delta \delta + \frac{\partial f_2}{\partial \omega} \Big|_{\omega=\omega_0} \Delta \omega + \dots \end{cases}$$

где

A

$$\Delta \delta = \delta - \delta_0, \quad \Delta \omega = \omega - \omega_0. \tag{4}$$

Аналогичные действия производим и для второй точки положения равновесия $\omega = \omega_0$, $\delta = \delta_1$. 3. Формируем матрицу Якоби, выписывая коэф-

фициенты при линейных членах:

$$\mathbf{A}(\delta,\omega) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial \omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial \omega} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}(\delta_0,\omega_0), \ \mathbf{A}_2 = \mathbf{A}(\delta_1,\omega_0).$$
(5)

Собственные числа матриц Якоби (4) и (5) позволят нам определить характер точек положения равновесия (3)

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega; \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{\Delta P}{T_J} = -\frac{1}{T_J} \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P}{\partial \omega} \Delta \omega \right). \\ \rightarrow \left(\frac{d\Delta\delta}{dt} \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} \right) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_J} \frac{\partial P}{\partial \delta} & -\frac{1}{T_J} \frac{\partial P}{\partial \omega} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{pmatrix}. \end{cases}$$

143

$$\begin{pmatrix} \frac{d\Delta\delta}{dt} \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{pmatrix} \to$$

$$\rightarrow \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_J} \frac{\partial P}{\partial \delta} & -\frac{1}{T_J} \frac{\partial P}{\partial \omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{P_m \cos(\delta)}{T_J} & 0 \end{pmatrix}.$$
 (6)

В интересующей нас области имеются две точки положения равновесия, тогда из (6)

$$\mathbf{A}(\delta_0, \omega_0) = \mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\mathbf{P}_m \cos(\delta)}{T_J} & 0 \end{pmatrix} \Big|_{\substack{\omega=0\\ \delta = \delta_0}}$$

И

$$\mathbf{A}(\delta_1, \omega_0) = \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\mathbf{P}_m \cos(\delta)}{T_J} & 0 \end{pmatrix} \Big|_{\substack{\omega=0\\\delta=\delta_1}} .$$
(7)

Записываем характеристическое уравнение в случае первой точки равновесия (7)

$$p^{2} + \frac{1}{T_{J}} \frac{\partial P}{\partial \delta} = 0 \quad \rightarrow p = \pm j \sqrt{\frac{1}{T_{J}} \frac{\partial P}{\partial \delta}} = \pm j\omega.$$
 (8)

Из (8) видно, что тип точки положения равновесия – центр (рис. 2).



Рис. 2. Угловая характеристика активной мощности P(δ) одномашинной системы и график синхронизирующей мощности дP/dδ. Кружками указаны точки положения равновесия

Fig. 2. Angular characteristic of active power $P(\delta)$ of the singlemachine system and the graph of synchronizing power $\partial P/\partial \delta$. Circles indicate equilibrium points

Записываем характеристическое уравнение в случае второй точки равновесия (7)

$$p^{2} - \frac{1}{T_{J}} \left| \frac{\partial P}{\partial \delta} \right| = 0 \quad \rightarrow p = \pm \sqrt{\frac{1}{T_{J}} \frac{\partial P}{\partial \delta}} = \pm \alpha_{1,2}.$$
 (9)

Из (9) видно, что тип точки положения равновесия – *cedлo*.

Вернемся к уравнению относительного движения ротора генератора (1)

$$T_{J}\frac{d\omega}{dt} = P - P_{m}\sin(\delta) = \Delta P.$$
 (10)

Запишем выражение (10) в энергетическом представлении, сделав ряд преобразований

$$T_{J} \frac{d\omega}{d\delta} \frac{d\delta}{dt} = \Delta P \rightarrow T_{J} \omega \frac{d\omega}{d\delta} = \Delta P \rightarrow$$
$$\rightarrow \frac{d}{d\delta} \frac{T_{J} \omega^{2}}{2} = \Delta P.$$
(11)

Проинтегрируем выражение (11) по углу и получим интеграл энергии

$$\int \frac{d}{d\delta} \frac{T_J \omega^2}{2} d\delta = \int \Delta P d\delta \rightarrow \frac{T_J \omega^2}{2} - \int \Delta P d\delta = C.$$
(12)

Выражение (12) – это уравнение сохранения энергии

$$\frac{T_J\omega^2}{2} + U(\delta) = E.$$
 (13)

Рассмотрим выражение для потенциальной энергии

$$U(\delta) = -\int_{0}^{\delta} (P_T - P_m \sin(\delta)) d\delta =$$
$$= P_m (1 - \cos(\delta)) - P_T \delta.$$
(14)

Комбинируя выражение для потенциальной энергии (14) и уравнение для полной энергии (13), получаем выражение для сепаратрисы

$$\omega(\delta) = \sqrt{\frac{2k}{T_J}} [P_T(\delta - \delta_{\rm kp}) + P_m(\cos(\delta) - \cos(\delta_{\rm kp}))], (15)$$

k – коэффициент преобразования радианов в градусы.

Используя выражение для сепаратрисы (15), строим потенциальную кривую и фазовый портрет, которые показывают очевидную классификацию точек положения равновесия (рис. 3). *Сепаратриса* разделяет фазовую плоскость на устойчивые и неустойчивые решения.

Очевидно, что устойчивые решения [19], замкнутые кривые внутри сепаратрисы, близкие к центру, будут напоминать колебания угла $\delta(t)$ близкие к гармоническим колебаниям. Решения за сепаратрисой неустойчивые, начинаются и заканчиваются большими значениями угла. В этом случае энергия возмущения, пришедшая из сети в генератор, значительно превосходит энергию генератора. Такие значения угла являются опасными для системы и приводят к аварийным ситуациям.

И наконец, пограничные решения, находящиеся на сепаратрисе, – это солитонные решения, решения со всплеском амплитуды.

Чтобы рассмотреть возможные решения нелинейного уравнения, будем использовать численный метод решения системы уравнений (2) методом Рунге-Кутта 4-го порядка [20–22]. Приведем примеры определения качания угла генератора для одномашинной системы при трех различных случаях (рис. 4).


Рис. 3. Сопоставление угловой характеристики вспомогательной функции потенциальной энергии и фазового портрета

Fig. 3. Comparison of the angular characteristics of potential energy auxiliary function and the phase portrait



Рис. 4. Восстановление после возмущения в точке a: a) не приводит к нарушению устойчивости работы генератора; б) приводит систему на границу динамической устойчивости; в) приводит к нарушению динамической устойчивости, после чего происходит уменьшение мощности турбины с последующим восстановлением синхронизма

Fig. 4. Recovery after disturbance at point a: a) does not violate generator stability; b) brings the system to the border of dynamic stability; c) leads to violation of dynamic stability, after which there is a decrease in turbine power with subsequent restoration of synchronism



- Рис. 5. Пример устойчивого решения: а) колебания угла в окрестности точки положения равновесия; б) график изменения активной мощности после удачного срабатывания автоматического повторного включения; в) изменение активной мощности во времени; г) фазовый портрет динамической системы, решение находятся в пределах сепаратрисы
- Fig. 5. Example of a stable solution: a) angle oscillations in the vicinity of the equilibrium point; b) graph of the change in active power after a successful automatic reclosing; c) change in active power over time; d) phase portrait of a dynamic system, the solution is located within the limits of the separatrix



Рис. 6. Пример, когда решение находится на границе устойчивости: а) колебания угла в окрестности точки положения равновесия имеет солитонное решение; б) график изменения активной мощности после запоздалого срабатывания автоматического повторного включения; в) изменение активной мощности во времени; г) фазовый портрет динамической системы, решение находятся на сепаратрисе

Fig. 6. Example when the solution is on the stability boundary: a) angle oscillations around the equilibrium point has a soliton solution; δ) graph of the change in active power after a delayed automatic reclosing; c) change in active power over time; d) phase portrait dynamical system, the solution is on a separatrix



- 1. Возмущение системы не приводит к нарушению устойчивости работы генератора.
- 2. Возмущение системы приводит систему на границу динамической устойчивости.
- 3. Возмущение системы приводит к нарушению динамической устойчивости, после чего происходит уменьшение мощности турбины с последующим восстановлением синхронизма.

В приведённых примерах на рис. 5-7 рассчитывается возмушение: на линии связи происходит однофазное короткое замыкание, которое ликвидируется отключением поврежденной фазы. С некоторой выдержкой времени происходит успешное повторное включение этой фазы, и схема возвращается в исходное состояние: P_1 – исходный, нормальный режим работы генератора; Р₂ – аварийный режим, режим однофазного короткого замыкания, который ликвидируется отключением поврежденной фазы, далее происходит неполнофазный режим – P_3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Baerthlein W., Audring D. Creating optimal power supply for extensive onshore oil fields // International Petroleum Exhibition and Conference. - Abu Dhabi,, 2018. - P. 49-53.
- 2. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2018. - Т. 329. - № 4. -C. 119–131.

Заключение

находятся за сепаратрисой и на сепаратрисе

Рассмотрены возможные варианты динамической устойчивости работы генератора при коротких замыканиях. Обнаружено, что при приближении к границе динамической устойчивости возникают солитоны – одиночные волны угла генератора. При распространении эти волны ведут себя как частицы, что позволяет производить анализ обмена энергиями (потоками мощности) как обмен механических частиц энергиями. При нарушении устойчивости возникают гармонические колебания, которые преобразуются в группу солитонов (рис. 6). Распространение солитонов можно рассматривать как распространение частиц. В частности, известно, что солитоны с большей амплитудой будут обгонять солитоны с меньшей амплитудой, позволяя представить картину перетоков мощности. Чтобы привести систему в синхронный режим, необходимо уменьшать активную мощность турбины, добиваясь равновесия между генерацией и потреблением активной мощности.

с последующим его восстановлением: а) график изменения активной мощности и мощности турбины во времени, изменение скольжения

(производной угла во времени); б) график изменения угла качания генератора во времени; в) число оборотов генератора при нарушении синхронного режима; г) фазовый портрет динамической системы, решение

Example of resynchronization, when there is a violation of stability followed

volutions number in case of synchronous violation; d) phase portrait of the

dynamic system, the solution is behind the separatrix and on the separatrix

- 3. Isaev Y.N., Kolchanova V.A., Tarasenko S.S., Tikhomirova O.V. Mathematical models of synchronous generators for different spatial distances of disturbance point // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. - Tomsk, 2015. - № 124 (1). - P. 1-5.
- 4. Belyaev A.N., Bryantsev A.M., Smolovik S.V. Magnetically controlled shunt reactor operation experience in 110-500 kV power grids // CIGRE Session 46. - Stara Lesna, Slovakia, 2016. -P. 142-146.



by its restoration: a) graph of the change in active power and power of the turbine over time, change in the slip (derivative of the angle over time); b) graph of the change in generator oscillation angle over time; c) generator re-

Fig. 7.

- Инженерные основы новой энергетики / А.Н. Власов, С.В. Галкин, Ю.И. Гребенченко, О.В. Ольшанский, О.О. Тужиков. – Волгоград: Принт, 2008. – 336 с.
- Brown M.P., Smith P.W. High power pulsed soliton generation at radio and microwave frequencies // Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. - Baltimore, 1997. - P. 346-354.
- Hernández S., Pontón M., Suárez A. Simulation method for complex multivalued curves in injection-locked oscillators // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. - 2017. - V. 65 (11). -P. 4046-4062.
- Хорошавин В.С., Зотов А.В., Мокрушин С.А. Общий подход к представлению динамики процесса в пространстве состояний // Advanced Science. – 2017. – № 2. – С. 38–46.
- Mathematical simulation application for research of nonuniform distributed-parameter circuit transients / E.O. Kuleshova, A.A. Plyusnin, E.B. Shandarova, O.V. Tikhomirova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016 – V. 124 (1). – P. 1–5.
- 10. Rowlands G., Rozmej P., Infeld E. Single soliton solution to the extended KdV equation over uneven depth // The European Physical Journal E. 2017. V. 40 (11). P. 1–5.
- Инфельд Э., Роуландс Дж. Нелинейные волны, солитоны и хаос. – М.: Физматлит, 2006. – 480 с.
- Nikoo M.S., Hashemi S.M.-A.. New soliton solution of a varactorloaded nonlinear transmission line // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. - 2017. - V. 65 (11). - P. 4084-4092.
- Лэм Дж. Л. Введение в теорию солитонов. М.: Мир, 1983. 294 с.
- Ахмедиев Н.Н., Анкевич А. Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с.
- An efficient analysis for N-soliton, Lump and Lump Kink solutions of time-fractional (2+1)-Kadomtsev–Petviashvili equation / M. Hamid, M. Usman, T. Zubair, R.U. Haq, A. Shafee // Physica

A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2019. – V. 528. – N
½ 121320. – P. 1–13.

- Mabrouk S.M., Rashed A S. N-solitons, Kink and periodic wave solutions for (3+1)-dimensional Hirota bilinear equation using three distinct techniques // Chinese Journal of Physics. – 2019. – V. 60. – P. 48–60.
- Melnikov L. Soliton fission and fusion in dispersion oscillating fiber and correlation properties of the pulses // Proc. 2016 International Conference Laser Optics. - St. Petersburg, 2016. -V. R87. - P. 1-5.
- Karczewska A., Rozmej P., Infeld E. Shallow-water soliton dynamics beyond the korteweg-de vries equation // Physical Review E Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2014. V. 90 (1). P. 1-5.
- Goldstein P., Infeld E. Stability of ion acoustic nonlinear waves and solitons in magnetized plasmas // Journal of Plasma Physics. - 2016. - V. 82 (6). - P. 1-5.
- Assessment of thermodynamic parameters of plasma shock wave / O.V. Vasileva, Y.N. Isaev, A.A. Budko, A.I. Filkov // Journal of Physics: Conference Series. - 2014. - V. 552 (1). - P. 1-5.
- Kolchanova V.A. Computational modeling of the tesla coil parameters // Ргосю of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Technique and Technologies, МТТ. Томск, 2002. № 1213709. Р. 32-33.
- 22. Дискретная математическая модель на основе билинейного преобразования синхронной электрической машины с витковым замыканием в обмотке ротора В.И. Полищук, В.В. Тимошкин, А.С. Глазырин, Е.В. Боловин // Электротехника. – 2019. – № 2. – С. 24–31.

Поступила 13.12.2019 г.

Информация об авторах

Исаев Ю.Н., доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Колчанова В.А., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кулешова Е.О., кандидат физико-математических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Филипас A.A., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.314.58:681.5.015

SOLITON SOLUTION OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Yusup N. Isaev¹,

isaev_yusup@mail.ru

Veroniaka A. Kolchanova¹,

ni105@mail.ru

Elena O. Kuleshova¹,

kul_2004@mail.ru

Alexander A. Filipas¹,

filipas@tpu.ru

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

The paper introduces the solution of the wave equation of the electromechanical system of electric power engineering in the form of a soliton – solitary wave. The causes of such waves are described. The solutions are considered in the phase plane, a numerical example of the soliton solution was given.

The main aim of the research is to find the soliton solutions in transients of electromechanical systems, and explain the causes of their occurrence, explain this physical phenomenon, determine the role this phenomenon plays in the sustainability assessment, and propose the measures to eliminate the violation of stability in the presence of a soliton wave.

Methods: phase plane method, numerical differential equation by the Runge-Kutt method, state space method.

Results. It was found out that when the turbine–generator equation solution is approaching to the dynamic stability boundary, the solitons – solitary waves of the generator angle – appear.

Conclusions. These waves behave like particles at propagation, that allows analyzing the exchange of energies (power flows) as the exchange in mechanical particles with energies. When stability is violated, harmonic oscillations arise, which are transformed into a group of solitons which propagation can be considered as the propagation of particles.

Key words:

Wave surge, soliton, electromechanical transients, dynamic system, phase space.

REFERENCES

- 1. Baerthlein W., Audring D. Creating optimal power supply for extensive onshore oil fields. *International Petroleum Exhibition and Conference*. Abu Dhabi, 2018. pp. 49–53.
- Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119-131. In Rus.
- Isaev Y.N., Kolchanova V.A., Tarasenko S.S., Tikhomirova O.V. Mathematical models of synchronous generators for different spatial distances of disturbance point. Proc. of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Tomsk, 2015. Vol. 124, no. 1, pp. 1–5.
- Belyaev A.N., Bryantsev A.M., Smolovik S.V. Magnetically controlled shunt reactor operation experience in 110–500 kV power grids. *CIGRE Session 46*. Stara Lesna; Slovakia, 2016. pp. 142–146.
- Vlasov A.N., Galkin S.V., Grebenchenko Yu.I., Olshansky O.V., Tuzhikov O.O. *Inzhenernye osnovy novoy energetiki* [Engineering basics of new energy]. Volgograd, Print Publ., 2008. 336 p.
- Brown M.P., Smith P.W. High power pulsed soliton generation at radio and microwave frequencies. Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, 1997. pp. 346-354.
- Hernández S., Pontón M., Suárez A. Simulation method for complex multivalued curves in injection-locked oscillators. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 2017, vol. 65, no. 11, pp. 4046–4062.
- Khoroshavin V.S., Zotov A.V., Mokrushin S.A. General approach to the representation of the dynamics of the process in the state space. *Advanced Science*, 2017, no. 2, pp. 38–46. In Rus.

- Kuleshova E.O., Plyusnin A.A., Shandarova E.B., Tikhomirova O.V. Mathematical simulation application for research of nonuniform distributed-parameter circuit transients. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, no 1, pp. 1–5.
- Rowlands G., Rozmej P., Infeld E. Single soliton solution to the extended KdV equation over uneven depth. *The European Phy*sical Journal E, 2017, vol. 40, no. 11, pp. 1–5.
- Infeld E., Roulands J. Nelineynye volny, solitony i khaos [Nonlinear waves, solitons and chaos]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 480 p.
- Nikoo M.S., Hashemi S.M.-A. New soliton solution of a varactorloaded nonlinear transmission line. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2017, vol. 65, no. 11, pp. 4084–4092.
- Lam J.L. Vvedenie v teoriyu solitonov [Introduction to the theory of solitons]. Moscow, Mir Publ., 2006. 294 p.
- Akhmediev N.N., Ankevich A. Nelineynye impulsy i puchki [Solitons. Nonlinear pulses and beams]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 304 p.
- Hamid M., Usman M., Zubair T., Haq R.U., Shafee A. An efficient analysis for N-soliton, Lump and Lump-Kink solutions of time-fractional (2+1)-Kadomtsev-Petviashvili equation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 528, pp. 1–13.
- Mabrouk S.M., Rashed A.S. N-solitons, Kink and periodic wave solutions for (3+1)-dimensional Hirota bilinear equation using three distinct techniques. *Chinese Journal of Physics*, 2019, vol. 60, pp. 48-60.
- 17. Melnikov L. Soliton fission and fusion in dispersion oscillating fiber and correlation properties of the pulses. *Proc.* 2016 Interna-

tional Conference Laser Optics. St. Petersburg, 2016. Vol. R87, pp. 1–5.

- Karczewska A., Rozmej P., Infeld E. Shallow-water soliton dynamics beyond the korteweg-de vries equation. *Physical Review E Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 1–5.
- Goldstein P., Infeld E. Stability of ion acoustic nonlinear waves and solitons in magnetized plasmas. *Journal of Plasma Physics*, 2016, vol. 82, no. 6, pp. 1–5.
- Vasileva O.V., Isaev Y.N., Budko A.A., Filkov A.I. Assessment of thermodynamic parameters of plasma shock wave. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 552, no. 1, pp. 1–5.
- Kolchanova V.A. Computational modeling of the tesla coil parameters. Proc. of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Technique and Technologies, MTT. Tomsk, 2002. Vol. 1213709, pp. 32-33.
- 22. Polishchuk V.I., Timoshkin V.V., Glazyrin A.S., Bolovin E.V. A discreet mathematical model based on the bilinear transformation of a synchronous electric machine with a turn-to-turn fault in the rotor winding. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90 (2), pp. 113–120.

Received: 13 December 2019.

Information about the authors

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Veroniaka A. Kolchanova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena O. Kuleshova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 519.714: 622.7

СНИЖЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Моркун Владимир Станиславович¹,

morkunv@gmail.com

Моркун Наталья Владимировна¹,

nmorkun@gmail.com.

Тронь Виталий Валериевич¹,

vtron@ukr.net.

Грищенко Светлана Николаевна¹,

s-grischenko@ukr.net.

Суворов Александр Иванович²,

o.suvorov@i.ua.

Паранюк Дмитрий Игоревич³,

paranyuk@i.ua

Сердюк Александра Юрьевна¹,

o.serdiuk@i.ua

- ¹ Криворожский национальный университет, Украина, 50027, г. Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11.
- ² Академия горных наук Украины, Украина, 50002, г. Кривой Рог, ул. Пушкина, 37.
- ³ «АрселорМиттал Кривой Рог», Украина, 50000, г. Кривой Рог, ул. Криворожстали, 1.

Актуальность исследования обоснована важностью задачи повышения качества нелинейных моделей технологических процессов обогащения железорудного сырья. Такое направление совершенствования средств моделирования сложных систем позволит повысить эффективность управления процессом обогащения и качество конечной продукции.

Цель: повышение точности динамических пространственно-временных математических моделей взаимосвязанных процессов для систем управления системой технологических агрегатов в условиях линии обогащения, сырьем для которой является рудный материал нескольких минералого-технологических разновидностей.

Объекты: динамические пространственно-временные математические модели взаимосвязанных процессов для систем управления технологическими агрегатами линии обогащения.

Методы: систематизация и анализ разработанных методов математического моделирования распределенных взаимосвязанных процессов, статистические методы и методы теории вероятностей для обработки результатов экспериментов, компьютерные информационные и программные технологии для реализации разработанных подходов.

Результаты. Предложен усовершенствованный подход к моделированию сложной системы процессов в условиях линии обогащения руды как пространственно-временных структур с распределенными параметрами с учетом показателей отдельных технологических стадий по всему спектру гранулометрической характеристики перерабатываемой руды. Для снижения размерности моделей, представленных в виде распределенных структур объектов управления, которые преобразовывают содержание и выход полезного компонента по всему спектру гранулометрической характеристики руды, целесообразно использовать метод диффузных карт, при этом ошибка Сэммона составила 2,6 %.

Ключевые слова:

Пространственно-временная модель, снижение размерности, метод диффузных карт, обогащение руды.

Введение

Для устойчивого развития горнорудных предприятий особое значение имеют вопросы снижения себестоимости продукции и оптимизации энергозатрат технологических процессов переработки сырья. Ситуация усложняется отрицательной динамикой качества рудного сырья и высокой энергоемкостью производства. Следует отметить, что в структуре энергозатрат предприятий горноперерабатывающей отрасли пятую часть составляет доля обогатительной фабрики. По затратам электроэнергии обогатительное отделение является наиболее энергоемким и потребляет почти половину от общего объема. На эффективность процесса обогащения существенно влияет размер вкраплений железа в руде [1]. Данная характеристика определяет необходимую крупность измельчения руды для ее наилучшего раскрытия: чем меньше вкрапления, тем тоньше должно быть измельчение. Таким образом, для каждой разновидности руды в процессе ее измельчения и классификации должен поддерживаться определенный гранулометрический состав [2, 3].

Математические модели обогатительных процессов могут быть разделены на несколько групп в зависимости от метода построения модели, ее структуры, специфики процесса и уровня использования информации о процессе. Проведенные исследования [4, 5] процессов обогащения руды показали, что упомянутые процессы характеризуются существенной нелинейностью. Значительная протяженность линии обогащения рудного материала создает предпосылки к рассмотрению данного объекта как системы с распределенными параметрами [6–8].

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для синтеза математических моделей в условиях обогатительных процессов необходим значительный объем информации о механических, физических, минералогических и химических характеристиках руды [9]: распределении частиц и полезного компонента в них по классам крупности. Также необходимы сведения о состоянии технологических обогатительных агрегатов: расходы руды и воды. Следует отметить, что в современных системах управления обогащением указанные параметры контролируются на нескольких стадиях, что существенно увеличивает общее количество параметров распределенной системы. Эффективным средством преодоления указанных проблем является применение специальных методов снижения размерности данных.

В работе [10] показано, что в процессе анализа экологических пространственных данных часто необходимо моделировать зависимости, сформированные динамическим пространственно-временным процессом. В то же время во многих случаях используется обобщенная линейная смешанная модель (Generalized Linear Mixed Model, GLMM) со случайным эффектом учета пространственной зависимости. Предложен динамический подход к учету пространственной зависимости, который включает в себя информацию о процессе формирования пространственно-временных данных.

Значительное количество пространственновременных процессов формируют наборы данных, которые содержат существенное количество нулевых значений [11]. Отмечено, что в таких случаях наиболее распространенным подходом является использование моделей с двумя независимыми частями. В работе рассмотрены методы повышения робастности таких моделей. Предложены пространственно-временные структуры для вывода базового пространственно-временного поведения исследуемого процесса. В то же время предложены средства повышения робастности моделей.

Проблема снижения размерности данных при идентификации непараметрических моделей и метод ее решения рассмотрены в работе [12]. Полученные результаты моделирования позволили сделать вывод о том, что во многих случаях снижение размерности выгодно с точки зрения уменьшения ошибки. Результаты моделирования также указывают на то, что при уменьшении размерности непараметрические модели в определенных условиях могут быть альтернативой параметрическим моделям.

Для решения задачи прогнозирования данных большой размерности в работе [13] рассмотрена модель, построенная с применением метода опорных векторов. Предложено развитие данного подхода с применением ядерных операторов. Показано, что задачу снижения размерности целесообразно решать в пространстве нелинейных ядер, при этом для прогнозирования и представления модели предложено использовать радиальную базисную функцию. Вместо того, чтобы продолжать распределение в оригинальном пространстве функции SVM, уменьшение размерности выполняется в пространстве функций ядра. Следует отметить, что предложенный метод обеспечивает снижение размерности и позволяет избежать избыточности модели.

В работах [14] представлены результаты формализации и анализа процесса обогащения рудного сырья в условиях неопределенности. Указано, что решение задачи оптимизации процесса управления затруднено пространственной распределенностью и большим количеством параметров объекта. Обоснована необходимость применения методов снижения размерности для повышения качества управления, в частности, с применением средств регрессионного анализа.

Осуществление регрессионного анализа характеризуется рядом вычислительных проблем, в частности мультиколлинеарностью [15]. Преодоление данной проблемы предложено осуществлять путем оптимизации с формированием соответствующей целевой функции. Указано, что такой подход обеспечивает повышение точности модели. Анализ полученных результатов показал, что ошибка прогнозирования модели пониженной размерности не превышает ошибку модели полной размерности.

В работе [16] для решения проблемы высокой размерности предложено совместить модельное обучение методом наименьших квадратов условной энтропии. Указанный метод одновременно выполняет оценку передаточных функций и снижение размерности. Проведенные экспериментальные исследования позволили сделать вывод о перспективности метода наименьших квадратов условной энтропии при решении задач большой размерности.

Динамические системы, описываемые обычными дифференциальными уравнениями или дифференциальными алгебраическими уравнениями, рассмотрены в работе [17]. Следует отметить, что в предложенном подходе физические параметры заменяются случайными величинами для количественного описания неопределенности. Исследованы два подхода к построению моделей пониженной размерности. Во-первых, снижается размерность стандартного базиса путем исключения базисных функций, для которых сопутствующие нормы Харди относительно невелики. Во-вторых, для системы Галеркина применяется процедура уменьшения размерности, которая позволяет определить новые базисные функции в рамках представления пониженной размерности. Результаты числовых экспериментов позволяют сделать вывод о том, что данный подход является перспективным.

В работах [18, 19] рассмотрены методы решения задачи моделирования и управления системой, которая характеризуется распределенностью параметров. В качестве примера взят процесс обогащения рудного сырья в условиях технологической линии. Показано, что синтез управления указанными процессами существенно усложняется большим количеством контролируемых параметров на каждой стадии технологической линии. Следовательно, в данном случае целесообразно применение методов снижения размерности.

Большинство существующих методов снижения размерности принимают матрицу сходства для формирования структуры данных, а затем эта матрица вычисляется с помощью определенной степени расстояния, чаще всего – эвклидовой [20]. Отмечено, что евклидово расстояние может моделировать только статическую структуру данных, а внутренняя информация о динамической структуре, как правило, игнорируется. Для преодоления этой проблемы предложены соответствующие методы снижения размерности. Упомянутые методы основаны на вероятностно обоснованном эффективном расстоянии. Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что разработанные методы характеризуются достаточной эффективностью.

Выделяют два подхода к формированию пространственно-временной модели распределенной системы [7]. Первый подход заключается в получении сигнала на выходе системы при подаче на вход комбинации единичных импульсных функций во временной и пространственной областях [6]. Второй подход предполагает определение выходного сигнала объекта при подаче на вход собственных вектор-функций оператора объекта. При таком условии распределенный объект представляют как бесконечное множество независимых контуров, которые являются условно сосредоточенными. При этом для каждого из них передаточные функции представлены отношением аналитических функций целого типа.

В работе [8] проанализированы особенности основных форм описания распределенных объектов. Отмечается, что особенностью распределенных систем является тот факт, что во входных и выходных сигналах выделяют пространственные составляющие. Поэтому в распределенных системах необходимо добавить пространственную форму к временным входным воздействиям.

Подход, рассмотренный в работе [21], предполагает, что для моделирования распределенных систем целесообразно использовать нейронные сети. По мнению авторов работы, такой подход целесообразен в том случае, когда функция, описывающая объект управления, характеризуется следующими свойствами: является композицией простых элементов, ее структура определяется подбором параметров из конечного набора, процедура подбора устойчива к возмущениям начальных данных и ошибкам вычисления. Отмечено, что аналитическое решение допускает небольшое число задач, а существующие методы приближенного решения подобно сетевым методам позволяют выполнить только поточечную аппроксимацию или выдвигают специальные требования к набору функций, при помощи которых осуществляют аппроксимацию. Наиболее важным преимуществом нейросетевой модели является ее устойчивость по отношению к ошибкам в данных – неточностям при определении коэффициентов уравнений, погрешностей вычислений, начальных и граничных условиях.

Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение точности динамических пространственно-временных математических моделей взаимосвязанных процессов для систем управления обогатительными агрегатами технологической линии.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

- 1. Обосновать подход к моделированию процессов обогащения железорудного сырья как пространственно-временных структур с распределенными параметрами с учетом показателей отдельных технологических стадий по всему спектру гранулометрической характеристики перерабатываемой руды.
- 2. Выбрать метод снижения размерности моделей объектов управления обогатительного производства как распределенных структур.

Материалы и методы исследования

Решение проблемы повышения эффективности процессов управления обогащением рудного сырья является одним из наиболее важных составляющих обеспечения устойчивого развития горных предприятий. Такой подход требует наличия качественной информации о процессе, формирования соответствующей базы данных и их последующей обработки для построения адекватных и эффективных математических моделей процессов и систем.

Технологические агрегаты обогатительного производства как объекты управления могут быть представлены как некоторые операторы, преобразующие векторы параметров входа-выхода [2, 3], учитывая при этом управляющие воздействия:

$$\overline{Y} = F(\overline{X}, \overline{U}), \tag{1}$$

где F – оператор, представляющий технологическую линию обогащения руды; X – вектор состояния; U – вектор управляющих воздействий.

В качестве управляющих воздействий в (1) могут выступать, в частности [2, 3]: расход руды и воды в мельницу, расход пульпы и воды в классификатор, расход пульпы и воды в гидроциклон, расход воды в зумпф, расход пульпы и воды в магнитный сепаратор. Следует отметить, что приложение управляющих воздействий к технологической линии обогащения осуществляется в обособленных друг относительно друга точках. При этом пути между данными точками характеризуются не только запаздыванием, которое возникает как следствие распределенности точек в пространстве, но и определенными динамическими характеристиками соответствующих технологических агрегатов, функционирующих в данной линии обогащения.

Выходные параметры отдельных стадий технологической линии обогащения (например, измельчение) необходимо рассматривать как входные для следующей стадии:

$$\overline{X_1} = F_1(\overline{X_0}, \overline{U_1}),$$

$$\overline{X_\ell} = F_\ell(\overline{X_{\ell-1}}, \overline{U_\ell}),$$
...,
$$\overline{Y} = \overline{X_L} = F_L(\overline{X_{L-1}}, \overline{U_L}).$$
(2)

где F_{ℓ} – операторы, представляющие отдельные технологические агрегаты, стадии или циклы линии обогащения руды $l\ell=\overline{1,L}$; L – количество агрегатов (стадий, циклов). Таким образом, при моделировании целесообразно учитывать, что в соответствии с (2) управляющее воздействие, приложенное в начале технологической линии, оказывает воздействие не только на технологический агрегат, перед которым находится точка его приложения, но также и на все последующие агрегаты.

В соответствии с результатами исследований [2] для количественной оценки рудного материала кроме показателя распределения минеральных частиц $\gamma(\xi)$ по фракциям с различными физическими свойствами ξ целесообразно использовать также показатель распределения ценных компонентов $\beta(\xi)$. Для количественной оценки эффективности работы технологических аппаратов используют сепарационные характеристики, которые определяют величину извлечения є минеральных фракций в продукты обогащения. Сепарационная характеристика представляет собой непрерывную функцию $\varepsilon(\xi)$, которая определяет зависимость извлечения элементарных фракций $[\xi, \xi + \Delta \xi]$ в концентрат от физического свойства ξ . К примеру, для замкнутого цикла измельчения руды, состоящего из мельницы и спирального классификатора, для каждой разновидности руды имеется оптимальный режим измельчения, который обеспечивает наибольшее содержание заданного класса крупности в готовом продукте при заданной производительности [2, 3]. Поддержание необходимой плотности и выхода песков обеспечивает наилучшее качество слива по содержанию контрольного класса крупности.

Элементами векторов выходных параметров $X_1 ... X_{\rm L} {\rm -}$ технологических агрегатов являются их качественные и количественные показатели на ℓ -м этапе технологического процесса, $\ell=1,L$. В процессе осуществляется изменение характеристических функций заданной физического свойства: массовой доли частиц $\gamma_l(\xi)$ в общей массе и содержания полезного компонента в них $\beta_{\ell}(\xi)$. Например, функция крупности характеризует распределение по классам частиц рудного материала $\gamma(d)$ и содержание полезного компонента $\beta(d)$ классах. Характеристики сырья технологической линии обогащения обозначим индексом 0: $\gamma_0(d)$, $\beta_0(d)$, тогда характеристики продукта технологической линии будут иметь индекс последней технологической операции $\ell = L$: $\gamma_{\ell}(d)$, $\gamma_{\ell}(d)$.

$$\overline{X_{\ell}} = \{ \gamma_{\ell}(d), \beta_{\ell}(d), \chi_{\ell} \}, \ \ell = \overline{1, L},$$
(3)

где γ – массовая доля отдельных классов, %; β – массовая доля железа в отдельных классах крупности, %; χ – удельные затраты электроэнергии данного технологического агрегата, кВт·ч/т; d – размер частиц руды, мм; ℓ – индекс технологической операции; L – количество технологических операций.

На рис. 1 представлен пример распределения железа по девяти классам крупности (рис. 1, a) и выход частиц данных классов в начальной точке (рис. 1, δ) технологической линии (разгрузки мельницы 1-й стадии) и в конечной точке (магнитный продукт 4-й стадии) [22, 23].

Для каждой минералого-технологической разновидности руды для лучшего раскрытия полезного компонента необходимо сформировать соответствующий размерам вкраплений гранулометрический состав частиц рудного материала.

То есть получить на выходе технологической линии заданную функцию распределения полезного компонента в классах $\|\beta_L(d) - \beta_L^*(d)\| \rightarrow \min$ и заданную гранулометрическую характеристику твердой фазы пульпы $\|\gamma_L(d) - \gamma_L^*(d)\| \rightarrow \min$.

Для представления распределения частиц твердой фазы пульпы по крупности использован метод, который предложен в работе [2]. В соответствии с данным методом непрерывное распределение $\beta(d)$, $\gamma(d)$ определяется на некотором множестве точек $d_0, d_1, d_2, ..., d_{N_d}$ и представляется вектор-столбцом порядка $N_d \times 1$ разниц значений функции в последовательных точках. В результате функции распределения по крупности $\beta(d)$, $\gamma(d)$ аппроксимируются по точкам определения функции. Преимуществом данного метода является возможность выбора точек определения функции в соответствии с системой оценки гранулометрического состава (размерами сит) в условиях определенного технологического процесса, а также возможность непосредственно оперировать числовыми значениями функции распределения без дополнительных преобразований, что обеспечивает одинаковое представление распределений произвольного вида.



Puc. 1. Функции распределения полезного компонента и выход классов крупности частиц рудного материала в начальной и конечной точке технологической линии обогащения

Fig. 1. Functions of useful component distribution and yield of particle size classes of ore material at the initial and final point of the processing line of enrichment

Следует отметить, что синтез модели существенно усложнен большим количеством параметров технологического процесса. Характерной особенностью технологических комплексов обогатительных фабрик как объектов управления является наличие в их структуре последовательных стадий обогатительных процессов. На каждой стадии задействуют несколько технологических агрегатов, что делает систему взаимосвязи между ними достаточно сложной. Также в системе взаимосвязи присутствуют рециклы – обратные связи, которые могут связывать агрегаты как одной, так и различных стадий.

Графики выхода классов крупности твердых частиц пульпы, в различных точках технологической линии обогащения, определенные по результатам измерений, находящихся у мест приложения управляющих воздействий, представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлены графики функции распределения железа по классам крупности твердых частиц пульпы, распределенной по технологической линии обогащения [22, 23].

На рис. 2, 3 приняты следующие обозначения точек измерения: 1, 6, 12 – разгрузка соответственно 1-й, 2-й и 3-й стадии измельчения; 2, 8, 13 – сливы соответственно 1-й, 2-й и 3-й стадии классификации; 3, 4 – магнитный продукт соответственно первого и второго приема 1-й стадии магнитной сепарации; 7, 10, 15 – магнитный продукт соответственно 2-й, 3-й и 4-й стадии магнитной сепарации; 5, 9, 11, 14 – пески соответственно 1-й, 2-й, 3-й и 4-й стадии классификации.

Как видно на рис. 2, 3, распределения по технологической линии соответственно выхода классов крупности твердых частиц пульпы и содержания железа в данных классах крупности претерпевают существенные изменения после каждого технологического агрегата. Это выражается в увеличении доли мелких частиц твердой фазы пульпы и сокращении доли крупных частиц, соответственно увеличивается и содержание железа в мелких частицах.

Как было показано выше, задачей управления является формирование такой сепарационной характеристики на выходе последнего технологического агрегата (точка 15 на рис. 2, 3), которая обеспечивает максимальное извлечение полезного компонента в концентрат. Следовательно, формирование управления каждым технологическим агрегатом должно быть направлено на достижение этой общей для всей технологической линии цели.

Поверхности распределенных по технологической линии обогащения показателей выхода классов крупности и содержания полезного компонента в них представлены соответственно на рис. 4, *a*, *б*.

Таким образом, в процессе управления технологической линией обогащения железорудного сырья необходимо учитывать значительное количество параметров, распределенных по всей протяженности технологической линии. Как показано выше, для типовой технологической линии контроль и приложение управляющих воздействий производят в 15 точках, существенно удаленных друг относительно друга. При этом в каждой точке контролируют большое количество параметров. Рассмотренная технологическая схема имеет 15 точек контроля, в каждой из которых производят контроль гранулометрического состава частиц рудного материала по 9 классам крупности, а также - контроль содержания полезного компонента в классах крупности. Следовательно, общее количество параметров составит (9+9).15=270. С учетом одного управляющего воздействия для каждого из пятнадцати технологических агрегатов количество параметров возрастает до 285.

В уравнении, которое описывает процесс обогащения железорудного сырья, в соответствии с изложенными выше положениями, следует учесть динамику распределения характеристик рудного материала в двух областях: пространственной и временной. Для этого введем соответствующую переменную $\beta^{d}(\ell,t)$, которая обозначает изменение во времени содержания железа в классах крупности рудного материала с учетом его распределения по

всей протяженности технологической линии обогащения:

$$\frac{\partial \beta^{d}(\ell,t)}{\partial t} = \theta_{1} \frac{\partial^{2} \beta^{d}(\ell,t)}{\partial \ell^{2}} + \theta_{2} \frac{\partial \beta^{d}(\ell,t)}{\partial \ell} + f(\beta^{d}) + wb(\ell)u(t),$$
(4)



Puc. 2. Распределение по технологической линии выхода классов крупности твердых частиц пульпы **Fig. 2.** Distribution on a technological line of an output of coarseness classes of pulp solid phase

с предельными $\beta^{d}(0,t)0$ и начальными условиями $\beta^{d}(\ell,0)=\beta_{0}^{d}(\ell)$. Методы осуществления декомпозиции систем, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных первого и второго порядка, в пространственной и временной областях представлены в работах [24–27].

расширена рядом пространственных базисных функций $\{\varphi_i(\ell)\}_{i=1}^{\infty}$. Для этого выполняют аппроксимацию функции рядом Фурье [28]:

$$\beta^{d}(\ell,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_{i}(\ell) \beta_{i}^{d}(t).$$
(5)

Пространственно-временная переменная $\beta^{i}(\ell,t)$ Для получения модели вида (4), которая будет применима на практике, следует упорядочить ба-



Puc. 3. Распределение по технологической линии функции содержания железа в классах крупности твердых частиц пульпы Fig. 3. Distribution of iron content function in the classes of pulp solid phase

зисные функции в выражении (5) по возрастанию частоты. После чего оставить первые n функций, выбрав n таким образом, чтобы обеспечить необходимую точность математической модели [24, 29]:

$$\beta_n^d(\ell,t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\ell) \beta_i^d(t).$$
(6)

Выполненная декомпозиция на пространственную и временную компоненты позволит предста-

вить исходные уравнения процесса обогащения руды в частных производных в виде системы конечной размерности [24]. Восстановление пространственно-временной системы осуществляют при помощи пространственно-временного синтеза.

На основе результатов исследований [30], выполненных для нелинейных динамических процессов с распределенными параметрами в условиях промышленного производства, можно сде-



б/b

 Puc 4.
 Распределение по технологической линии обогащения: а) выход классов крупности; б) содержание железа общего в промпродукте

 Fig. 4.
 Distribution by enrichment processing line: a) yield of the fineness classes of the pulp solid phase; b) total iron content in the product

лать вывод о том, что использование метода Карунена–Лоева является целесообразным для идентификации пространственных базисных функций в модели (6), при одновременном использовании временных функций Лагерра. Преобразование Карунена–Лоева сигнала $\beta^{i}(t)$ является разложением сигнала по базису ортогональных функций [24]:

$$\int_{0}^{T} K(t,s)\varphi_{j}(s)ds = \lambda_{j}\varphi_{j}(t);$$
$$\beta^{d}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_{n}} a_{n}\varphi_{n}(t), \ 0 \le t \le T,$$

где K(t,s) — корреляционная функция. Основная идея данного подхода заключается в существовании и использовании связанного со свойствами сигнала $\beta^{d}(t)$ ядра.

Задача вычисления наиболее характерной пространственной структуры $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^n$ среди репрезентативных данных процесса обогащения руды $\{\beta^i(\lambda,t)\}_{i=1,i=1}^{N,L}$ решена путем минимизации целевой функции [24]:

$$\min_{\varphi_i(x)} \left\{ \left[\beta^d(\ell_i, t) - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\ell)(\varphi_i(\ell), \beta^d(\ell_i, t)) \right]^2 \right\};$$

$$(\varphi_i(\ell), \varphi_i(\ell)) = 1, \quad i = \overline{1, n}.$$
(7)

Ограничение $(\varphi_i(\ell), \varphi_i(\ell))=1, i=\overline{1,n}$ в задаче (7) наложено для того, чтобы гарантировать единственность функции $\varphi_i(\ell)$. Пространственно-временная динамика процесса обогащения разделена на ортонормированные пространственные и временные моды, используя сингулярное разложение:

$$\beta^{d}(\ell,t) = \sum_{i=1}^{m} \sigma_{i} \varphi_{i}(\ell) \psi_{i}(t), \quad \sigma_{1} \ge \sigma_{2} \ge \ldots \ge \sigma_{m}, \quad (8)$$

где сингулярные величины $\varphi_i(t)$ обозначают значимость мод, левые сингулярные функции $\varphi_i(t)$ представляют пространственные моды, а правые сингулярные функции $\psi_i(t)$ – временные моды.

При разложении *m*-порядка решением будут первые *n* пространственных мод. В случае, когда отсутствует точное описание процесса обогащения руды уравнениями динамики в частных производных вида (8), возникает необходимость идентификации системы по входным и выходным данным с помощью метода минимизации ошибки прогнозирования [24].

Результаты исследования

Правильные выводы о качестве ведения технологического процесса можно сделать только на основе достаточно большого количества данных о выходе различных по составу и крупности классов исходного материала в конкретных условиях обогатительного производства. Информация о такой сложной системе частиц, как реальная пульпа, может быть представлена совокупностью фракционных выдержек или разграничительных цифр по каждой элементарной категории долей (классов) с известным параметром разделения и крупностью. Чем больше число классов, на которые разбит частицы материала, поступающего на обогащение, тем полнее будет расчетная информация для технолога или проектировщика о поведении этого материала в зоне сепарационных агрегатов. На основе полученных данных можно регулировать процесс обогащения, изменяя скорость подачи материала (производительность), магнитную силу (магнитная сепарация), реагентный режим (флотация) и другие при условии заданного объема изъятия долей полезного компонента в концентрат [31].

Наиболее точную оценку качества работы технологических агрегатов обогатительного производства может дать информация о содержании полезного компонента по всему спектру гранулометрической характеристики перерабатываемой руды. Поскольку эта характеристика является нелинейной функцией с большим количеством входных и выходных параметров, модель этих объектов имеет высокую размерность, что делает ее неудобной для анализа и использования при формировании управления технологическим процессом.

Уменьшение размерности данных является эффективным инструментом для работы с многомерными данными. Цель редукции заключается не только в снижении вычислительной сложности, но и в стремлении структурировать полученную информацию, выделить основные составляющие исследуемого процесса.

Вектор сигналов технологической линии обогащения железорудного сырья (3) в момент времени *t*, который в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$\overline{X}(t) = (x^{(1)}(t), x^{(2)}(t), ..., x^{(p)}(t))^T, p = \overline{1, P},$$

целесообразно преобразовать в вектор

$$R(t) = (r^{(1)}(t), r^{(2)}(t), ..., r^{(p)}(t))^{T}, p = 1, P',$$

где P' << P, то есть вектор существенно меньшей размерности, состоящий из наиболее информативных переменных входного вектора.

В то же время элементы вектора $\overline{R}(t)$ определяют по совокупности входных признаков $\overline{X}(t)$, например их линейных комбинаций. Соотношение между векторами $\overline{R}(t)$ и $\overline{X}(t)$ представим как [32]:

$$R(t) = \ddot{\mathrm{E}}\{X(t)\},\$$

где Λ – оператор преобразования в пространство меньшей размерности. Применение данного подхода позволит повысить эффективность идентификации распределенных процессов обогащения рудного материала. При формировании управляющих воздействий следует выполнить обратное преобразование к пространству исходной размерности:

$$X(t) = \ddot{\mathrm{E}}^{-1} \{ R(t) \},$$

где $\Lambda^{\scriptscriptstyle -1}$ – оператор преобразования в пространство начальной размерности.

С точки зрения характера исходных данных методы снижения размерности классифицируют на две категории: линейные и нелинейные. По степени сохранности геометрической структуры редукции они включают в себя локальный и глобальный подход.

Методы моделирования многообразия (Manifold Learning) можно разделить на три категории [33]: глобальное сопоставление линейной модели, нелинейный метод сохранения локального свойства и нелинейный метод сохранения глобального свойства. Основные отличия глобального и локального метода лежат в локальной структуре.

В табл. 1 перечислены основные характеристики рассматриваемых методов снижения размерности: параметрический характер отражения между многомерным и маломерным пространствами; свободные параметры, которые должны быть оптимизированы; вычислительная сложность алгоритма; необходимый объем оперативной памяти [33].

Таблица 1.Свойства методов снижения размерностиTable 1.Properties of methods for dimension reduction

Mетод снижения размерности Method for di- mension reduc- tion	Параме- тризация Parame- terization	Свободные параметры Free parame- ters	Вычислитель- ная слож- ность Computational complexity	Объем оперативной памяти RAM size
PCA	да yes	Отсутствуют Absent	$O(D^3)$	$O(D^2)$
MDS	нет по	k	k	$O((nk)^3)$
Isomap	нет по	k	k	$O(n^3)$
LLE	нет по	k	k	$O(pn^2)$
Hessian LLE	нет по	k	k	$O(pn^2)$
Laplacian EM	нет по	k, σ	k, σ	$O(pn^2)$
Diffusion maps	нет по	σ, t	σ, t	$O(n^3)$
LTSA	нет по	k	k	$O(pn^2)$

Анализ свойств, приведенных в табл. 1, показывает:

- Большинство методов снижения размерности не является параметрическими. Это означает, что метод не определяет прямое отражение с многомерного в маломерное пространство (или наоборот).
- 2) Функции большинства нелинейных методов имеют свободные параметры, которые должны быть оптимизированы. Под свободными параметрами понимаются те что непосредственно влияют на функцию стоимости, которая оптимизируется. Невыпуклые методы снижения размерности имеют дополнительные свободные параметры, такие как скорость обучения и граничное число итераций. Кроме того, метод LLE использует при исчислении параметр регуляризации реконструкции весов.
- 3) Вычислительная сложность алгоритма имеет важное значение для его практической применимости. Вычислительная сложность в этом случае определяется следующими факторами: свойствами набора данных: количеством точек входных данных *n* и их размерностью *D*; пара-

метрами метода: числом ближайших соседей k(для методов, основанных на графах), числом итераций i (для итерационных методов), отношением ненулевых элементов в разреженной матрице к общему количеству элементов; количеством m локальных моделей анализаторов факторов в LLC.

Рассмотрим результаты исследования основных подходов к снижению размерности на примере трехмерного множества нормированных характеристик рудного материала (рис. 5).



Рис. 5. Результат кластеризации входных данных

Fig. 5. Result of input clustering

Для сравнения эффективности различных методов использована информация о разделении магнитным сепаратором измельченных частиц в железорудной пульпе. Каждая минералого-технологическая разновидность пульпы характеризуется несколькими параметрами. Набор данных представляет собой совокупность фракционных выдержек или разграничительных цифр по каждой элементарной категории долей (классов) с известным параметром разделения и крупностью.

Метод главных компонент (Principal Components Analysis, PCA) позволяет получить представление данных меньшей размерности, которое описывает направление наибольшего изменения входных данных [33]. Полученное линейное преобразование *T* максимизирует выражение:

$$F = T^T \operatorname{cov}_{X - \overline{X}} T \to \max,$$

где соv_{*X*- \bar{X} – ковариационная матрица центрированных относительно начала координат данных *X*. Применение данного метода позволило получить корректное отображение входных данных в пространство меньшей размерности по 1,04–1,15 с. Результат проецирования входных данных на первые две главные компоненты (k_1 , k_2) представлен на рис. 6.}

Нелинейный метод многомерного шкалирования (multidimensional scaling, MDS) [34, 35] сохраняет значения попарных расстояний между точками данных. Качество отображения описывается функцией, которая оценивает разницу попарных расстояний в начальном многомерном представлении и полученном представлении меньшей размерности. Примером такой функции является функция напряжения:

$$F(Y) = \sum_{i,j} (\|x_i - x_j\| - \|y_i - y_j\|)^2,$$

где $||x_i - x_j|| - Эвклидово расстояние между точками данных большей размерности; <math>||y_i - y_j|| - Эвклидово расстояние между точками данных меньшей размерности.$



Рис. 6. Результат снижения размерности с помощью метода *PCA*

Fig. 6. Result of dimension reduction using the PCA method

Альтернативой рассматриваемой функции может быть функция стоимости Сэммона, которая делает больший акцент на сохранении сначала малых расстояний:

$$F(Y) = \frac{1}{\sum_{ij} ||x_i - x_j||} \sum_{ij} \frac{(||x_i - x_j|| - ||y_i - y_j||)^2}{||x_i - x_j||}$$

Минимизация функции напряжения выполнена с использованием метода сопряженных градиентов [34]. Время получения отображения входных данных в пространство меньшей размерности при использовании данного метода составило 21,07-22,86 с. Графическое представление результата проецирования входных данных на первые две главные компоненты (k_1, k_2) методом MDS представлено на рис. 7.



Рис. 7. Результат снижения размерности с помощью метода MDS

Fig. 7. Result of dimension reduction using the MDS method

Недостатком метода многомерного шкалирования является то, что он не позволяет учитывать распределение прилегающих точек, поскольку основывается на Эвклидовых расстояниях [33]. Например, в случае, когда многомерные данные относятся к криволинейном многообразиям, расстояние между ними может быть значительно больше, чем Эвклидово. В этом случае целесообразно использовать метод Isomap [36], учитывающий криволинейное расстояние между точками данных. Геодезические расстояния между точками в Isomap вычисляются с помощью построения графа. При этом каждая точка связана с ее k ближайшими соседями во множестве данных X. Самый короткий путь между двумя точками графа, который оценивает криволинейное расстояние между двумя точками, определяется с помощью алгоритма Дийкстры [37, 38]. Результат проецирования входных данных на первые две главные компоненты (k_1,k_2) с помощью метода Isomap представлен на рис. 8.



Рис. 8. Результат снижения размерности с помощью метода ISOMAP

Fig. 8. Result of dimension reduction using ISOMAP method

Метод диффузных карт основывается на анализе процесса Марковского случайного перемещения на пространстве данных. Первым этапом метода диффузных карт (Diffusion Maps, DM) [39, 40] является формирование графа данных. При вычислении матрицы W весов ребер графа использованы гауссовы ядерные функции. Затем на основе матрицы W вычисляется нормированная матрица $p^{(1)}$:

$$p_{ij}^{(1)} = \frac{W_{ij}}{\sum_{k} W_{ik}}.$$

Матрица $p^{(1)}$ представляет вероятность перехода от одной точки данных к другой за единицу времени. Матрица переходов вперед для *t*-й единицы времени $p^{(1)}$ определяется $(p^{(1)})^t$. На основе вероятностей перехода $p_{ij}^{(t)}$ определяется расстояние распространения:

$$D^{(t)}(x_i, x_j) = \sum_k \frac{(p_{ik}^{(t)} - p_{jk}^{(t)})^2}{\psi(x_k)^{(0)}},$$

где $\psi(x_i)^{(0)} = m_i / \Sigma_j m_j - коэффициент, придает больше$ веса элементам графа с большей плотностью, $<math>m_i = \Sigma_j p_{ij}$ – степень узла. Из данного уравнения можно увидеть, что пары точек с большей вероятностью перехода имеют меньшее расстояние распространения. Вычисление расстояния распространения основывается на многих путях графа, что обеспечивает большую устойчивость к шумам, чем геодезическое расстояние. Ненулевые главные собственные вектора для формирования представления меньшей размерности *Y*, которое позволяет сохранить расстояние распространения, находят из выражения:

$P^{(t)}Y = \lambda Y.$

Собственные векторы в представлении меньшей размерности являются нормируемыми по соответствующим собственным значениям:

$$Y = \{\lambda_2 v_2, \lambda_3 v_3, \dots, \lambda d_{+1} v d_{+1}\}.$$

Результат проецирования входных данных на первые две главные компоненты (k_1, k_2) с помощью метода диффузных карт представлен на рис. 9.



Puc.9. Результат снижения размерности с помощью метода Diffusion Map

Fig. 9. Result of dimension reduction using the Diffusion Map method

Сравнение качества получаемых данных низкой размерности осуществлялось путем оценки степени сохранности локальной структуры данных. Оценка выполнялась двумя способами [41]: путем оценки ошибки классификации *k*-ближайшего соседа для классификаторов, обучающихся на низкоразмерных представлениях данных. Классификация данных в низкоразмерных пространстве проводилась при *k*=12; путем оценки достоверности и непрерывности представлений малой размерности.

Степень достоверности определяется как:

$$T(k) = 1 - \frac{2}{nk(2n-3k-1)} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in U_i^{(k)}} (r(i, j-k))$$

где r(i,j) — ранг точки данных J в низкоразмерных пространстве в соответствии с вычисленными попарными расстояниями между низкоразмерными точками данных; переменная U указывает на то множество точек, которые являются одними из K ближайших соседей в низкоразмерном пространстве. Мера непрерывности определяется по формуле:

$$C(k) = 1 - \frac{2}{nk(2n-3k-1)} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in V_i^{(k)}} (r(i, j-k))$$

где r(i,j) – ранг точки данных J в пространстве высокой размерности, вычисленный в соответствии с попарными расстояниями между высокоразмер-

ными точками данных; переменная V указывает на то множество точек, которые являются одними из K ближайших соседей в пространстве высокой размерности.

Обсуждение результатов

Ошибки обобщения k-Nn достоверности и непрерывности позволяют оценить степень сохранности локальной структуры данных. Оценка качества на основе ошибки обобщения, надежности и непрерывности имеет важное преимущество перед оценкой ошибки реконструкции, так как для успешной визуализации или классификации данных их локальная структура должна быть сохранена.

В табл. 2 приведены ошибки обобщения *k-Nn* классификаторов и соответствующие значения достоверности, полученные путем применения различных методов снижения размерности.

Габлица 2.	Анализ методов снижения размерности данных
Table 2.	Analysis of the data reduction methods

	-			
	Установки	Ошибки обобще-		
Метол	параме-	ния классифика- Достове		Непрерыв-
Mathad	тров	торов (%) ность		ность
Methou	Parameter	Parameter Classifiers genera-		Continuity
	settings	lization errors (%)		
PCA	нет/no	5,15	0,95	0,92
MDS	$5 \le k \le 15$	4,68	0,82	0,96
Isomap	$5 \le k \le 15$	4,98	0,85	0,73
LLE	$5 \le k \le 15$	4,97	0,71	0,75
Hessian LLE	$5 \le k \le 15$	4,11	0,52	0,63
Laplacian EM	$5 \le k \le 15$	1.65	0.95	0.70
	<i>σ</i> =1	4,00	0,65	0,79
Diffusion Maps	$10 \le t \le 100$	3.86	0.03	0.04
	<i>σ</i> =1	5,00	0,95	0,94
LTSA	$5 \le k \le 15$	3,62	0,59	0,64

Таким образом, при формировании математических моделей процессов обогащения руды целесообразно выполнять снижение размерности, применяя нелинейные методы (Isomap, Laplacian Eigenmap). Вместе с тем названные методы после преобразования данных не позволяют обеспечить оптимальные условия для классификации. Вследствие этого кроме нелинейного преобразования пространства необходимо увеличивать различительную способность признаков с применением анализа главных компонент.

Вычисленные значения результативности методов снижения размерности с использованием функции стоимости Сэммона приведены в табл. 3.

Наилучшие результаты были получены методом диффузных карт, при этих обстоятельствах ошибка Сэммона составила ε =2,6 %, $\sigma(\varepsilon)$ =0,011, среднее время выполнения T=0,127 с.

Выводы

 Основываясь на том, что конечные результаты работы обогатительной фабрики зависят от множества входных параметров и результатов функционирования комплекса взаимосвязан-

Таблица З.	Результативность методов снижения размерности
	данных

Метод Method	Ошибка Error <i>є</i>	Стандартное отклонение ошибки Error standard deviation σ(ε)	Среднее время выполнения Average execution time T, c	
PCA	0,028	0,012	0,18008	
MDS	0,027	0,011	0,90678	
Isomap	0,084	0,014	0,65598	
LLE	0,241	0,018	0,36894	
Hessian LLE	0,381	0,015	0,23029	
Laplacian EM	0,264	0,019	0,14284	
DM	0,026	0,011	0,12676	
LTSA	0,317	0,012	0,06873	

Table 3.	Effectiveness of the data reduction methods

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - № 3. - P. 38-41.
- Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. М.: Недра, 1981. – 342 с.
- Процуто В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1987. – 253 с.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Model synthesis of nonlinear nonstationary dynamical systems in concentrating production using Volterra kernel transformation // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - № 10. - P. 6-9.
- Morkun V., Tron V., Paraniuk D. Formation of rock geological structure model for drilling process adaptive control system // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - № 5. - P. 12-15.
- Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
- Григорьев В.В., Быстров С.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 198 с.
- Першин И.М., Малков А.В., Воронин А.Ю. Системы с распределенными параметрами. – Пятигорск: СКФУ, 2013. – 40 с.
- Investigation of the effect of the gas-containing suspensions characteristics on the parameters of the of ultrasonic waves propagation process / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron, S. Hryshchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2017. - V. 6. - № 5 (90). - P. 49-58.
- Dynamic spatio-temporal models for spatial data / T.J. Hefley, M.B. Hooten, E.M. Hanks, R.E. Russell, D.P. Walsh // Spatial Statistics. - 2017. - V. 20. - P. 206-220.
- Spatio-temporal model structures with shared components for semi-continuous species distribution modelling / I. Paradinas, D. Conesa, A. López-Quílez, J.M. Bellido // Spatial Statistics. – 2017. – V. 22. – P. 2. – P. 434–450.
- Wilson P.W. Dimension reduction in nonparametric models of production // European Journal of Operational Research. – 2018. – V. 267. – Iss. 1. – P. 349–367.
- Jiang H., Dong Y. Dimension reduction based on a penalized kernel support vector machine model // Knowledge-Based Systems. – 2017. – V. 138. – P. 79–90.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - № 5. - P. 7-11.
- Lansangan J.R.G., Barrios E.B. Simultaneous dimension reduction and variable selection in modeling high dimensional data // Computational Statistics & Data Analysis. – 2017. – V. 112. – P. 242–256.

ных технологических агрегатов, предложен усовершенствованный подход к моделированию процессов обогащения железорудного сырья как пространственно-временных структур с распределенными параметрами с учетом показателей отдельных технологических стадий по всему спектру гранулометрической характеристики перерабатываемой руды.

- Для снижения размерности моделей объектов управления обогатительного производства, представленных как распределенные структуры, преобразовывающие содержимое и выход полезного компонента по всему спектру гранулометрической характеристики руды, целесообразно использовать метод диффузных карт, при этом ошибка Сэммона составила 2,6 %.
- Tangkaratt V., Morimoto J., Sugiyama M. Model-based reinforcement learning with dimension reduction // Neural Networks. – 2016. – V. 84. – P. 1–16.
- Pulch R. Model order reduction and low-dimensional representations for random linear dynamical systems // Mathematics and Computers in Simulation. - 2018. - V. 144. - P. 1-20.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Distributed control of ore beneficiation interrelated processes under parametric uncertainty // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - № 8. - P. 18-21.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 7. – P. 16–19.
- Zhang D., Zhu Q., Zhang D. Multi-modal dimensionality reduction using effective distance // Neurocomputing. 2017. V. 259. P. 130-139.
- Васильев А.Н. Математическое моделирование распределенных систем с помощью нейронных сетей // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 12. – С. 32–42.
- 22. Дослідження впливу динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку на газові бульбашки у пульпі для управління параметрами її газової фази у процесі флотації: звіт про НДР / Керівник роботи Т.А. Олійник. – 0115U003053. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2016. – 201 с.
- Хміль І.В. Особливості технології подрібнення магнетитових кварцитів в умовах об'ємного нерівномірно-компонентного стиснення: дис. ... канд. техн. наук. – Кривий Ріг, 2016. – 158 с.
- Li H.-X., Qi C. Modeling of distributed parameter systems for applications A synthesized review from time–space separation // Journal of Process Control. – 2010. – V. 20. – P. 891–901.
- Sooraksa P., Chen G. Mathematical modeling and fuzzy control of a flexible-link robot arm // Mathematical and Computer Modelling. - 1998. - V. 27 (6). - P. 73-93.
- Demetriou M.A., Fahroo F. Model reference adaptive control of structurally perturbed second-order distributed parameter systems // International Journal of Robust and Nonlinear Control. - 2006. - V. 16. - P. 773-799.
- Moheimani S.O.R., Pota H.R., Petersen I.R. Spatial balanced model reduction for flexible structures // Automatica. – 1999. – V. 35. – P. 269–277.
- Zill D.G., Cullen M.R. Differential equations with boundary-value problems. 5th ed. – Pacific Grove, CA; Australia: Cole Thomson Learning, 2001. – 614 p.
- Fletcher C.A.J. Computational Galerkin methods. New York: Springer, 1984. - 302 p.
- Qi C. Modeling of nonlinear distributed parameter system for industrial thermal processes: doctoral dissertation. - Hong Kong, 2009. - 186 p.

- High-energy ultrasound using to improve the quality of iron ore particles purification in the process of its enrichment / V. Morkun, G. Gubin, T. Oliinyk, V. Lotous, V. Ravinskaia, V. Tron, N. Morkun, M. Oliinyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2017. - V. 6. - № 12 (90). - P. 41-51.
- 32. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности: справ. изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин / под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
- 33. Maaten van der L., Postma E.O., Herik van den H.J. Dimensionality reduction: a comparative review. 2008. URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.125. 6716&rep=rep1&type=pdf (поступила 05.09.2019).
- Cox T., Cox M. Multidimensional scaling. -London, UK: Chapman & Hall, 1994. - 10 p.
- Kruskal J.B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis // Psychometrika. - 1964. -V. 29. - P. 1-27.
- 36. Tenenbaum J.B. Mapping a manifold of perceptual observations // In Advances in neural information processing systems. – 1998. – V. 10. – P. 682–688.

- Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. – 1959. – V. 1. – P. 269–271.
- 38. Floyd R.W. Algorithm 97: shortest path // Communications of the ACM. 1962. V. 5 (6). 345 p.
- 39. Lafon S., Lee A.B. Diffusion maps and coarse-graining: a unified framework for dimensionality reduction, graph partitioning, and data set parameterization // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. - 2006. - V. 28 (9). -P. 1393-1403.
- Diffusion maps, spectral clustering and the reaction coordinates of dynamical systems / B. Nadler, S. Lafon, R.R. Coifman, I.G. Kevrekidis // Applied and Computational Harmonic Analysis: Special Issue on Diffusion Maps and Wavelets. - 2006. -V. 21. - P. 113-127.
- Moodi H., Bustan D. On identification of nonlinear systems using Volterra kernels expansion on Laguerre and wavelet function // Chinese Control and Decision Conference. - China, 2010. -P. 1141-1145.

Поступила 12.09.2019 г.

Информация об авторах

Моркун В.С., доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Криворожского национального университета.

Моркун Н.В., доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

Тронь В.В., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

Грищенко С.Н., кандидат педагогических наук, заведующая отделом научно-технической информации научно-исследовательской части Криворожского национального университета.

Суворов А.И., научный сотрудник Академии горных наук Украины.

Паранюк Д.И., инженер департамента по безопасности публичного акционерного общества «АрселорМиттал Кривой Рог».

Сердюк А.Ю., ассистент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета. UDC 519.714: 622.7

REDUCING DIMENSION OF SPATIO-TEMPORAL MODELS OF NONLINEAR DYNAMIC PROCESSES OF IRON ORE RAW MATERIALS ENRICHMENT

Vladimir S. Morkun¹, morkunv@gmail.com

Natalia V. Morkun¹, nmorkun@gmail.com

Vitaliy V. Tron¹, vtron@ukr.net

Svitlana M. Hryshchenko¹,

s-grischenko@ukr.net

Oleksandr I. Suvorov², o.suvorov@i.ua

Dmitriy I. Paraniuk³,

paranyuk@i.ua

Oleksandra J. Serdiuk¹,

o.serdiuk@i.ua

- Krivoi Rog National University,
 11, Vitaliy Matusevych street, Krivoi Rog, 50027, Ukraine.
- ² Academy of Mining Sciences of Ukraine,
 37, Pushkin street, Krivoi Rog, 50002, Ukraine.
- ³ Private Joint Stock Company «ArcelorMittal Krivoi Rog», 1, Krivorozhstal street, Krivoi Rog, 50000, Ukraine.

The relevance of the research is caused by the need to improve the accuracy of mathematical models of nonlinear dynamic processes of iron ore raw materials enrichment. This direction of improving the modeling tools for complex systems will make better the control of enrichment and the quality of the final products.

The main aim of the research is to increase the accuracy of dynamic spatiotemporal mathematical models of interrelated processes for control systems of the technological enrichment line of ore represented by mineral-technological varieties.

Objects: dynamic spatiotemporal mathematical models of interrelated processes for control systems of the technological ore enrichment line. **Methods:** systematization and analysis of the developed methods of mathematical modeling of distributed interrelated processes, methods of mathematical statistics and probability theory for processing experimental results, computer information and software technologies for implementing the developed approaches.

Results. The authors have proposed the improved approach for modeling iron ore raw material enrichment as spatio-temporal structures with distributed parameters, taking into account the indices of individual technological stages throughout the spectrum of the granulometric characteristics of the processed ore. To reduce the dimensionality of the models represented as distributed structures of control objects, which transform the content and yield of the useful component over the entire spectrum of ore granulometric characteristics, it is advisable to use the method of diffusion maps, in this case the Sammon's error was 2,6 %.

Key words:

Space-temporal model, dimensional reduction, diffuse maps method, ore dressing.

REFERENCES

- 1. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 3, pp. 38-41.
- Linch A. Tsikly drobleniya i izmelcheniya [Crushing and grinding cycles]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 342 p.
- Protsuto V.S. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami obogatitelnykh fabrik [Automated control systems of technological processes of concentrating factories]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 253 p.
- 4. Morkun V., Morkun N., Tron V. Model synthesis of nonlinear nonstationary dynamical systems in concentrating production us-

ing Volterra kernel transformation. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 10, pp. 6–9.

- Morkun V., Tron V., Paraniuk D. Formation of rock geological structure model for drilling process adaptive control system. *Me tallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 5, pp. 12–15.
- Butkovskiy A.G. Teoriya optimalnogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Theory of optimal control of systems with distributed parameters]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 474 p.
- Grigoryev V.V., Bystrov S.V., Pershin I.M. Sintez raspredelennykh regulyatorov [Synthesis of distributed controllers]. St-Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2010. 198 p.

- Pershin I.M., Malkov A.V., Voronin A.Yu. Sistemy s raspredelennymi parametrami [Systems with distributed parameters]. Pyatigorsk, SKFU Publ., 2013. 40 p.
- Morkun V., Morkun N., Tron V., Hryshchenko S. Investigation of the effect of the gas-containing suspensions characteristics on the parameters of the of ultrasonic waves propagation process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 6, 5 (90), pp. 49–58.
- Hefley T.J., Hooten M.B., Hanks E.M., Russell R.E., Walsh D.P. Dynamic spatio-temporal models for spatial data. *Spatial Statistics*, 2017, vol. 20, pp. 206–220.
- Paradinas I., Conesa D., López-Quilez A., Bellido J.M. Spatiotemporal model structures with shared components for semi-continuous species distribution modelling. *Spatial Statistics*, 2017, vol. 22, P. 2, pp. 434–450.
- Wilson P.W. Dimension reduction in nonparametric models of production. European Journal of Operational Research, 2018, vol. 267, Iss. 1, pp. 349-367.
- Jiang H., Dong Y. Dimension reduction based on a penalized kernel support vector machine model. *Knowledge-Based Systems*, 2017, vol. 138, pp. 79–90.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 5, pp. 7–11.
- Lansangan J.R.G., Barrios E.B. Simultaneous dimension reduction and variable selection in modeling high dimensional data. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2017, vol. 112, pp. 242-256.
- Tangkaratt V., Morimoto J., Sugiyama M. Model-based reinforcement learning with dimension reduction. *Neural Networks*, 2016, vol. 84, pp. 1–16.
- Pulch R. Model order reduction and low-dimensional representations for random linear dynamical systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2018, vol. 144, pp. 1–20.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Distributed control of ore beneficiation interrelated processes under parametric uncertainty. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 8, pp. 18–21.
- Morkun V., Morkun N., Tron V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, pp. 16-19.
- Zhang D., Zhu Q., Zhang D. Multi-modal dimensionality reduction using effective distance. *Neurocomputing*, 2017, vol. 259, pp. 130–139.
- Vasilyev A. N. Matematicheskoe modelirovanie raspredelennykh sistem s pomoshchyu neyronnykh setey [Mathematical modeling of distributed systems using neural networks]. Matematicheskoye modelirovanie, 2007, vol. 19, no. 12, pp. 32-42.
- 22. Oliynyk T.A. Doslidzhennya vplyvu dynamichnykh efektiv vysokoenerhetychnoho ultrazvuku na hazovi bulbashky u pulpi dlya upravlinnya parametramy yiyi hazovoyi fazy u protsesi flotatsiyi. Zvit pro NDR [Investigation of the influence of dynamic effects of high-energy ultrasound on gas bubbles in a pulp to control the parameters of its gas phase during flotation. Research report]. Krivoy Rog, Krivoy Rog National University Publ., 2016. 201 p.
- Khmil I.V. Osoblyvosti tekhnolohiyi podribnennya mahnetytovykh kvartsytiv v umovakh obyemnoho nerivnomirno-komponentnoho stysnennya. Dis. Kand. nauk [Features of the technology of grinding magnetite quartzite in conditions of bulk non-uniformly-component compression. Cand. Diss.]. Krivoy Rog, 2016. 158 p.

- Li H.-X., Qi C. Modeling of distributed parameter systems for applications A synthesized review from time-space separation. Journal of Process Control, 2010, vol. 20, pp. 891–901.
- Sooraksa P., Chen G. Mathematical modeling and fuzzy control of a flexible-link robot arm. *Mathematical and Computer Modelling*, 1998, vol. 27 (6), pp. 73–93.
- Demetriou M.A., Fahroo F. Model reference adaptive control of structurally perturbed second-order distributed parameter systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2006, vol. 16, pp. 773–799.
- Moheimani S.O.R., Pota H.R., Petersen I.R. Spatial balanced model reduction for flexible structures. *Automatica*, 1999, vol. 35, pp. 269–277.
- Zill D.G., Cullen M.R. Differential equations with boundary-value problems. 5th ed. Cole Pacific Grove, CA; Australia, Thomson Learning, 2001. 614 p.
- Fletcher C.A.J. Computational Galerkin Methods. New York, Springer, 1984. 302 p.
- Qi C. Modeling of nonlinear distributed parameter system for industrial thermal processes. Doctoral dissertation. Hong Kong, 2009. 186 p.
- 31. Morkun V., Gubin G., Oliinyk T., Lotous V., Ravinskaia V., Tron V., Morkun N., Oliinyk M. High-energy ultrasound using to improve the quality of iron ore particles purification in the process of its enrichment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 6, no. 12 (90), pp. 41–51.
- 32. Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika: klassifikatsiya i snizhenie razmernosti [Applied statistics: classification and dimension reduction]. Ed. by S.A. Ayvazyan. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989. 607 p.
- Maaten van der L., Postma E.O., Herik van den H.J. Dimensionality reduction: a comparative review. 2008. Available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1. 125.6716&rep=rep1&type=pdf (accessed 5 September 2019).
- Cox T., Cox M. Multidimensional scaling. London, UK, Chapman & Hall, 1994. 10 p.
- Kruskal J.B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika*, 1964, vol. 29, pp. 1–27.
- Tenenbaum J.B. Mapping a manifold of perceptual observations. In Advances in neural information processing systems, 1998, vol. 10, pp. 682-688.
- Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, 1959, vol. 1, pp. 269-271.
- Floyd R.W. Algorithm 97: shortest path. Communications of the ACM, 1962, vol. 5 (6), 345 p.
- 39. Lafon S., Lee A.B. Diffusion maps and coarse-graining: a unified framework for dimensionality reduction, graph partitioning, and data set parameterization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, vol. 28 (9), pp. 1393–1403.
- Nadler B., Lafon S., Coifman R.R., Kevrekidis I.G. Diffusion maps, spectral clustering and the reaction coordinates of dynamical systems. *Applied and Computational Harmonic Analysis: Special Issue on Diffusion Maps and Wavelets*, 2006, vol. 21, pp. 113–127.
- Moodi H., Bustan D. On identification of nonlinear systems using Volterra kernels expansion on Laguerre and wavelet function. *Chinese Control and Decision Conference*, China, 2010. pp. 1141-1145.

Received: 12 September 2019.

Information about the authors

Vladimir S. Morkun, Dr. Sc., professor, Krivoi Rog National University.
Natalia V. Morkun, Dr. Sc., associate professor, Krivoi Rog National University.
Vitaliy V. Tron, Cand. Sc., associate professor, Krivoi Rog National University.
Svitlana M. Hryshchenko, Cand. Sc., Krivoi Rog National University.
Oleksandr I. Suvorov, researcher, Academy of Mining Sciences of Ukraine.
Dmitriy I. Paraniuk, Public Joint Stock Company «ArcelorMittal Krivoi Rog».
Oleksandra J. Serdiuk, Krivoi Rog National University.

УДК 622-83-52:621.678:622.276.5

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДОБЫЧИ НЕФТИ

Чернышева Татьяна Александровна¹,

cherta@tpu.ru

Аникин Василий Владимирович^{2,3},

v-anikin2012@mail.ru

Чернышев Игорь Александрович¹,

chia@tpu.ru

Чернышев Александр Юрьевич¹,

ach@tpu.ru

- ¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- ² Нижневартовский государственный университет, Россия, 628600, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56.
- ³ Омский государственный технический университет, Россия, 644000, Омск, пр. Мира, 11.

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения аварийности частотно-регулируемых асинхронных электроприводов центробежных насосных установок добычи нефти вследствие перегрева асинхронных двигателей.

Цель: исследовать частотно-регулируемые электроприводы центробежных насосных установок добычи нефти, работающих при скорости выше номинальной.

Методы исследования основаны на использовании теории автоматического управления и имитационного моделирования в программной среде MatLab-Simulink.

Результаты. Составлена схема имитационного моделирования скалярного частотно-регулируемого асинхронного электропривода центробежных насосных установок добычи нефти, учитывающая основные особенности реального электропривода. Рассчитаны механические характеристики электропривода насосной установки. Определены возможные диапазоны регулирования скорости электропривода насосной установки исходя из допустимых потерь мощности в установившихся и переходных режимах.

Выводы. Несмотря на то, что статическая механическая характеристика электропривода с частотой напряжения преобразователя 30 Гц является минимально возможной для добычи нефти с помощью погружных насосов, диапазон регулирования скорости в асинхронном электроприводе погружного насоса необходимо расширить до D=1:10 для плавного пуска электропривода. Установлено, что для уменьшения ударных моментов при пуске асинхронного частотно регулируемого электропривода темп роста частоты на выходе задатчика интенсивности должен составлять несколько десятков секунд даже при пуске на минимальную рабочую скорость электропривода. Неизбежное завышение по мощности асинхронного двигателя для погружного центробежного насоса при его выборе как ближайшего большего из ряда номинальных значений позволяет электроприводу насоса с частотным регулированием скорости работать без перегрева на статических характеристиках выше номинальной. Установлено, что в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе центробежного насоса возможное повышение скорости на 10–12 % от номинальной позволяет увеличить объем добычи нефти без замены оборудования.

Ключевые слова:

Центробежная насосная установка, асинхронный двигатель, двухзвенный преобразователь частоты, инвертор напряжения, скалярное регулирование, потери энергии.

Введение

Бурение скважин на нефть производят после геофизических исследований на предполагаемых участках земной поверхности. После того как скважина пробурена и вскрыт продуктивный пласт, нефть необходимо поднять на поверхность. В начале эксплуатации скважины возможен подъем нефти за счет пластовой природной энергии. При эксплуатации скважины давление в нефтяном коллекторе снижается, и подъем нефти не может осуществляться за счет внутрипластового давления. Добычу нефти можно поддерживать, если в нефтеносный пласт закачивать попутный газ, воздух [1] или жидкость [2] с поверхности. Однако такой способ добычи – газлифтный – находит экономическое обоснование только на ранних стадиях освоения месторождения.

В дальнейшем нефть качают из скважины с помощью штанговых скважинных насосов или погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН). Добычу нефти с помощью штанговых скважинных насосов экономически целесообразно осуществлять с глубин от нескольких десятков до сотен метров, предельная глубина опускания штанговых насосных установок доходит до 1500 м.

При отмеченной, сравнительно небольшой глубине залегания нефтеносных пластов станки качалки отличаются большой надежностью и могут работать без капитального ремонта несколько лет. Применяются штанговые насосы в скважинах с низким дебитом. Их производительность находится в диапазоне 5–50 м³/сут., а подача пластовой жидкости в среднем по Российской Федерации составляет 14,1 т/сут.

Механические станки качалки требуют для своей установки массивные фундаменты, ненадежны при работе в наклонных и горизонтальных скважинах даже на небольшой глубине, так как возникает опасность разрушения обсадной колонны или штока качалки при их взаимном трении. Штанговые насосные установки до недавнего времени оснащались преимущественно нерегулируемыми электроприводами с асинхронными короткозамкнутыми двигателями (АД).

Увеличение межремонтного периода можно добиться, применяя вместо штанговых насосов электроцентробежные насосы, вращающиеся погружными асинхронными двигателями с частотным регулированием скорости. ЭЦН позволяют длительное время откачивать из скважины пластовую жидкость, содержащую песок, газ и коррозионно активные элементы.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода позволит уже в ближайшее время если не полностью отказаться от станков качалок, то значительно сократить их количество.

В России [3], особенно в Западной Сибири, уже в настоящее время около 80 % нефти добывается электроцентробежными насосами. Их производительность составляет 114 т/сут., т. е. превышает в 8 раз производительность установки со штанговыми насосами. Очевидно, что ЭЦН применяются в высокодебитных скважинах.

Температура пластовой жидкости на глубине установки электроцентробежного насоса может достигать 90 °С. Гидростатическое давление в зоне установки электродвигателя на глубине *l* можно найти из выражения

$$p_{\rm rc} = \rho_{\rm \pi...}l, \tag{1}$$

где $\rho_{n.ж}$ – плотность пластовой жидкости, кг/м³; l – глубина зоны установки электродвигателя по вертикали, м.

Плотность пластовой жидкости находится в диапазоне от 700 кг/м³ (нефть с незначительными примесями) до максимального значения 1400 кг/м³. Из (1) следует, что на глубине 1500 м при плотности пластовой жидкости $\rho_{n,m}=1400$ кг/м³ давление в зоне установки электродвигателя может достигать 19 МПа.

На рис. 1 приведена скважина с погружным электроцентробежным насосом. Погружной трех-

фазный асинхронный двигатель – 3 с короткозамкнутым ротором получает питание по трехжильному бронированному кабелю – 4. Так как диаметр асинхронного двигателя - 3 в скважине ограничен, при больших его установленных мощностях он имеет большую длину и выполняется секционным. Для увеличения надежной работы двигателя он заполняется маслом с высокой диэлектрической прочностью, близким по свойствам с трансформаторным маслом. Для выравнивания давления масла в двигателе и пластовой жидкости служит компенсатор давления - 1. Пластовая жидкость поступает в колонну через прорези – 2 в колонне, в нижней ее части. Изменения давления масла в асинхронном двигателе – 3 вследствие его нагрева или увеличения глубины погружения приводят к тому, что эластичная диафрагма компенсатора – 1 деформируется, выравнивая давление. Это уменьшает вероятность попадания механических примесей в электродвигатель, увеличивая межремонтный период.

Протектор – 5, расположенный между асинхронным двигателем и насосом, отделяет электродвигатель, заполненный маслом, от насоса, заполненного пластовой жидкостью, и при этом передает вращение от двигателя к насосу. Протектор – 5 защищает двигатель от попадания пластовой жидкости в маслонаполненный электродвигатель со стороны насоса и предотвращает утечку масла при передаче вращения от электродвигателя к насосу.

Газосепаратор – 6 используется для снижения количества газа на входе в насос. Газосепаратор удаляет газ в затрубное пространство и исключает образование газовых пробок в насосе, благодаря чему повышается срок его службы, а вместе с тем и всей скважины.

Многоступенчатый центробежный насос – 7 отличается малым диаметром рабочих ступеней и большим их количеством, доходящим до нескольких сотен. Длина насоса может достигать 6 м. Приемные отверстия насоса и фильтр расположены в нижней его части. Верхний и нижний концы вала насоса установлены в подшипниках скольжения. При большой длине насоса возникающие радиальные вибрации гасятся дополнительными радиальными подшипниками, установленными по длине насоса.

В колонне с центробежным насосом установлен обратный клапан – 8. Он удерживает закаченную в насосно-компрессорную трубу – 10 пластовую жидкость при плановых или аварийных остановках ЭЦН для исключения обратного вращения насоса под действием гидростатического напора жидкости, оставшейся в трубе. Сливной клапан – 9 обеспечивает возврат в затрубное пространство пластовой жидкости.

Многоступенчатый центробежный насос – 7 со всем вспомогательным оборудованием (рис. 1) опускают в скважину на колонне насосно-компрессорных труб и подвешивают на шайбе – 11 без дополнительного крепления к скважине.



- Рис. 1. Основные элементы скважины с электроцентробежным насосом: 1 – компенсатор давления, 2 – прорези в колонне, 3 – маслозаполненный трехфазный асинхронный двигатель, 4 – трехжильный бронированный кабель, 5 – протектор, 6 – газосепаратор, 7 – многоступенчатый центробежный насос, 8 – обратный клапан, 9 – сливной клапан, 10 – насосно-компрессорная труба, 11 – шайба, 12 – устьевое оборудование
- Fig. 1. Main elements of the well with electric centrifugal pump: 1 is the pressure compensator, 2 are the slots in the column, 3 is the oil filled three phase induction motor, 4 is the three-core armored cable, 5 is the protector, 6 is the gas separator, 7 is the multistage centrifugal pump, 8 is the back pressure valve, 9 is the overflow valve, 10 is the flow string, 11 is the plate, 12 is the wellhead equipment

Наземное оборудование скважины содержит устьевое оборудование – 12, предназначенное для сбора и отвода пластовой жидкости и попутного газа, а также электрооборудование – трансформаторы, фильтры, преобразователь частоты системы управления – для плавного пуска и экономичной работы электроцентробежного насоса.

Функциональная схема наземного оборудования погружного электроцентробежного насоса

Функциональная схема электропривода электрической части наземного оборудования погружного электроцентробежного насоса приведена на рис. 2. Как правило, электрическая энергия к скважинам подводится напряжением 10 или 6 кВ и снижается до стандартного напряжения 400 В понижающим трансформатором TV1.

Преобразователь частоты (ПЧ) электропривода насоса подключается к понижающему трансформатору TV1 через автомат QF1. Для уменьшения нагрузочных помех в питающей сети из-за широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователем частоты на его входе установлен сетевой фильтр (СФ).

Так как для подъема пластовой жидкости погружными электроцентробежными насосами требуется регулирование скорости в небольшом диапазоне (D=1:10), для вращения насосов вполне достаточно использовать относительно простые общепромышленные преобразователи частоты со скалярным управлением. Причем скалярные электропривода при температурных изменениях параметров двигателя не требуют перестройки регуляторов по причине их отсутствия. На выходе преобразователя частоты устанавливается выходной синусный фильтр (ВСФ). ВСФ преобразует выходное напряжение прямоугольной формы ШИМ-модуляции в напряжение практически синусоидальной формы с коэффициентом искажения, не превышающим 0,05 о.е. Кроме того, ВСФ позволяет исключить волновые электромагнитные и резонансные процессы в длин-



Рис. 2. Функциональная схема электрической части наземного оборудования погружного электроцентробежного насоса: TV1 – понижающий трансформатор, QF1 – автомат, ПЧ – преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения, TV2 – повышающий трансформатор напряжения, М – асинхронный двигатель, П – протектор, ЦН – центробежный насос

Fig. 2. Functional diagram of the electrical part of the ground equipment of a submersible electric centrifugal pump: TV1 is the step-down transformer, QF1 is the circuit breaker, $\Pi \Psi$ is the frequency converter with autonomous voltage inverter, TV2 is the step-up voltage transformer, M is the induction motor, Π is the protector, ΠH is the centrifugal pump

ном кабеле от преобразователя частоты до погружного асинхронного двигателя в скважине.

Как правило, используемый преобразователь частоты – общепромышленного назначения на линейное напряжение 380 В. А погружные асинхронные двигатели M специального назначения выпускаются на напряжения 600–3000 В. Для согласования напряжений общепромышленного преобразователя частоты и специального погружного асинхронного двигателя применяется повышающий трансформатор TV2. Повышающий трансформатор TV2 и асинхронный двигатель M соединены трехжильным кабелем-удлинителем.

Погружной ЦН подключается к асинхронному двигателю M через протектор (П), и вместе они составляют инерционную массу с моментом инерции J_{Σ} .

Статические характеристики электропривода погружного электроцентробежного насоса

Для электропривода любого механизма представляет интерес расчет статических и динамических характеристик для предварительной оценки его работоспособности с различной скоростью необходимого диапазона ее регулирования.

Произведем расчет статических характеристик частотно-регулируемого электропривода и электроцентробежного насоса 1ЭЦН5А-500-800, последний имеет следующие параметры [4]: мощность $N_{\text{нас}}$ =84,5 кВт; номинальная частота вращения насоса $n_{\text{нас}}$ =2820 об/мин; КПД η_{H} =0,54 о.е.; напор 810 м; подача 500 м³/сут.

Механическую характеристику насоса рассчитаем по формуле:

$$M_{\rm Hac} = \Delta M_{\rm nocr} + b\omega^{x}, \qquad (2)$$

где x – показатель степени; $\Delta M_{\text{пост}}$ – момент постоянных потерь, Н·м; b – коэффициент, определяемый в точке номинальной работы насоса, Н·м/(рад·с⁻¹)^x.

$$\Delta M_{\text{пост}} = a_{\text{H}} \left(\frac{N_{\text{Hac}}}{\eta_{\text{H}} \omega_{\text{Hac}}} - \frac{N_{\text{Hac}}}{\omega_{\text{Hac}}} \right),$$

где $\omega_{\text{\tiny Hac}}$ – номинальная угловая скорость насоса,

рад/с; $a_{\rm H} = \frac{1 - \eta_{\rm H}}{2\eta_{\rm H}}$ – коэффициент постоянных по-

терь насоса в номинальном режиме, о.е.;

Теоретически [5, 6] для центробежных насосов показатель степени у скорости в (2) равняется 2. Практически в уравнении механической характеристики центробежного насоса (2) показатель степени у скорости меняется в пределах 2,5–6 для различных конструкций и условий работы насоса [6]. Механическая характеристика центробежного насоса, построенная по (2) с показателем степени x=2, изображена на рис. 3, кривая 1. Там же приведена механическая характеристика насоса (кривая 2) с показателем степени у скорости x=3. Как следует из анализа механических характеристик 1 и 2, при малых скоростях, то есть меньших, чем $\omega \leq 300$ рад/с, они достаточно близки, характери

стики существенно расходятся при больших скоростях $\omega \ge 300$ рад/с. Экспериментальные исследования, проведенные на лабораторном стенде с насосом, позволяют сделать вывод, что показатель степени у скорости ближе к 3. В дальнейших расчетах будем принимать показатель степени у скорости в механической характеристике насоса x=3.

Насос вращается погружным маслонаполненным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором фирмы АЛНАС типа ЭДТ110–117 Мб, имеющим следующие паспортные данные [7]: номинальная мощность $P_{\rm H}$ =110 кВт; синхронная частота вращения n_0 =3000 об/мин; номинальное линейное напряжение 2300 В; номинальный КПД $\eta_{\rm H}$ =0,84 о.е.; номинальный соѕ $\varphi_{\rm H}$ =0,84 о.е.; номинальное скольжение $s_{\rm H}$ =0,06 о.е.; количество секций – 1; длина – 8,24 м; масса – 571 кг; скорость охлаждающей жидкости не менее 0,3 м/с; отношение максимального момента $M_{\rm max}$ к номинальному $M_{\rm H}$ моменту погружного электродвигателя должно быть не менее 2 (ТУ 3381–026–21945400–97), принято $\lambda_{\rm M}$ =2,2 о.е.

Двигатель завышен по мощности, однако окончательный вывод можно сделать только по завершении расчетов статических и динамических характеристик, а также по тепловому режиму работы электропривода.

По каталожным данным двигателя, в соответствии с методикой, изложенной в [8, 9], определены параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя ЭДТ110-117М6: R₁=2,294 Ом – активное сопротивление обмотки статора: *R*₂=2,253 Ом – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора; X_{1сн}=3,131 Ом – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора при номинальной частоте питающей сети f_{1H}; X'_{2лн}=4,247 Ом – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора при номинальной частоте питающей сети f_{1H}; X_{ин}=120,295 Ом – индуктивное сопротивление контура намагничивания при номинальной частоте питающей сети f_{1н}.

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя, построенная по паспортным данным, приведена на рис. 3, ее контрольные точки, отмеченные треугольниками – △, полностью совпадают с каталожными данными двигателя ЭДТ110–117 Мб. Точка 3 – синхронная скорость, режим идеального холостого хода; 4 – точка номинального режима работы асинхронного двигателя; 5 – максимальный момент асинхронного двигателя.

Искусственные механические характеристики асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором напряжения можно рассчитать по уравнению:

$$M = \frac{3(U_{1j} - 2U_{VD} - 2U_{VT})^2 R_2'}{\omega_{0j} s \left[(X_{1\sigma H} + X_{1 \mu 06} + X_{2\sigma H}')^2 f_{1*}^2 + \left(R_1 + R_{1 \mu 06} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{(R_1 + R_{1 \mu 06}) R_2'}{s X_{\mu H} f_{1*}} \right)^2 \right]},$$

171

где $R_{\rm 1до5}$ – добавочное активное сопротивление кабеля-удлинителя, проводов, соединяющих преобразователь частоты и обмотки статора асинхронного двигателя; Ом; $X_{1_{\rm доб}}$ – добавочное индуктивное сопротивление кабеля-удлинителя, проводов, соединяющих преобразователь частоты и обмотки статора асинхронного двигателя; Ом; U_{VD} =1, В – прямое падение напряжение на диоде выпрямительного моста двухзвенного преобразователя частоты; $U_{VT} \approx 1,5, B$ – прямое падение напряжение на *IGBT*транзисторе инвертора напряжения; $f_{1*} = f_{1i}/f_{1H}$ – относительная частота напряжения инвертора; f_{1i} – текущее значение частоты напряжения инвертора; U_{1j} – фазное напряжение обмоток статора асин-

хронного двигателя;
$$\omega_{0j} = \frac{\pi f_{1j}}{p}$$
 – синхронная

угловая скорость; р – число пар полюсов асинхронного двигателя. Остальные обозначения физических величин общепринятые для Т-образной схемы замещения асинхронного короткозамкнутого двигателя.

Активное сопротивление одной жилы кабеляудлинителя $R_{1_{\text{каб}}}$, имеющего наибольшее влияние на добавочное сопротивление $R_{1,100}$, можно найти из выражения:

$$R_{1_{\text{Ka6}}} = \frac{l\rho}{S} [1 + \alpha(\theta - 20)] =$$
$$= \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 1,79 \cdot 10^{-3}}{16} [1 + \alpha(\theta - 20)] = 0,1428 \text{ Om}.$$

где *l*=1·10³ – длина кабеля, м; *р*=1,79·10⁻³ Ом·мм²/м – удельное электрическое сопротивление меди при температуре 20 °С, Ом·мм²/м; S=16 – сечение жилы кабеля мм²; *α*=0.00393 – температурный коэффициент электрического сопротивления меди, 1/°C [10].

Индуктивное сопротивление одного километра жилы кабеля удлинителя находится по формуле [10]:

$$X_0 = \left(0,145 \lg \frac{2D_{\rm cp}}{d} + 0,0157 \,\mu_r\right) \cdot 10^{-3} =$$
$$= \left(0,145 \lg \frac{2 \cdot 7,3}{4,5} + 0,0157 \cdot 1\right) \cdot 10^{-3} = 8,96 \cdot 10^{-5} \frac{\rm Om}{\rm M}$$

где $D_{co}=7,3$ – расстояние между центрами жил кабелей, мм; d=4,5 – диаметр токоведущей жилы кабеля, мм; $\mu_r = 1$ – магнитная проницаемость меди. Тогда

$$X_{1 \text{kab}} = X_0 l = 6,67 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^3 = 0,0667$$
 Om.

Известно [11-16], что при работе преобразователя частоты с инвертором напряжения в режиме ШИМ-модуляции выходное напряжение преобразователя уменьшается в 1,174 раза со стандартного фазного $U_{1_{\phi_{\rm H}}}$ =220 В до $U_{1_{\phi_{\rm H}}}$ =181,37 В за счет деления между обмотками асинхронного двигателя напряжения звена постоянного тока на две равные части. Поднять напряжение инвертора с ШИМ-модуляцией можно введением третьей гармоники в сигнал управления инвертором [16]. Максимальное выходное напряжение инвертора в этом случае достигает U_{1ф1}=209,3 В, причем третья гармоника напряжения в выходном сигнале инвертора момент асинхронного двигателя не создает.

При частотах преобразователя меньших номинальной влияние активного сопротивления статорной цепи $R_{1 \text{доб}}$ уменьшает критический момент асинхронного двигателя. Его увеличение можно осуществить, изменив вольт-частотную характеристику преобразователя частоты.

И, наконец, в рассматриваемой схеме электропривода (рис. 2), когда асинхронный двигатель удален от преобразователя частоты на расстояние в несколько сотен метров по условиям работы в скважине, напряжение на двигателе можно поднять, используя отпайки повышающего трансформатора напряжения TV2 на выходе преобразователя частоты (рис. 2). Рассмотренные три фактора позволяют получить механические характеристики электропривода со скалярным управлением и законом управления инвертором напряжения U_{1i}/f_{1i}^2 =const, приведенные на рис. 3.

Как следует из рекомендаций фирмы-изготовителя погружного асинхронного двигателя ЭДТ110-117 М6, скорость охлаждающей пластовой жидкости между стенкой обсадной трубы скважины и внешним кожухом асинхронного двигателя при работе центробежного насоса не должна быть меньше 0,3 м/с. Такая скорость охлаждающей пластовой жидкости достигается при питании двигателя центробежного насоса напряжением с частотой не ниже 30 Гц. Кроме того, частота 30 Гц питания асинхронного двигателя позволяет обеспечить минимальные условия смазывания подшипников погружного асинхронного двигателя насоса и устранить риск «полусухого трения», что является одной из причин выхода асинхронного двигателя погружного насоса из строя. Таким образом, статическая характеристика электропривода с частотой напряжения преобразователя 30 Гц является минимально возможной для добычи нефти с помощью погружных насосов.

Однако нижний предел диапазона регулирования асинхронного электропривода насоса необходимо расширить для плавного пуска электропривода от задатчика интенсивности, изменив вольтчастотную характеристику преобразователя частоты со скалярным законом регулирования (механическая характеристика при 20 Гц на рис. 3).

На рис. 3 приведены механические характеристики электропривода для работы во II зоне - в диапазоне скоростей выше естественной характеристики двигателя. Регулирование скорости во второй зоне происходит с законом регулирования f_{1i} =var; $U_{1\phi} = U_{1\mu}$. Регулирование в зоне выше естественной характеристики происходит с ослаблением потока и с постоянной мощностью. Механическая характеристика механизма, работающего с постоянной мощностью, приведена на рис. 3, кривая 6. Она расходится с механической характеристикой насоса -

нелинейно-возрастающей механической характеристикой (кривая 2). Однако если потери в асинхронном двигателе с погружным центробежным насосом в скважине на характеристиках во второй зоне не превысят номинальных потерь в двигателе, велик соблазн работать со скоростью выше номинальной с целью увеличения производительности скважины и объема добычи нефти.



Рис. 3. Механические характеристики скалярного асинхронного электропривода погружного центробежного насоса: 1 – механическая характеристика нагрузки с показателем скорости x=2; 2 – механическая характеристика нагрузки (центробежного насоса) с показателем скорости x=3; 3 – синхронная скорость, режим идеального холостого хода, 4 – точка номинального режима работы асинхронного двигателя, 5 – максимальный момент асинхронного двигателя; 6 – механическая характеристика механизма, работающего с постоянной мощностью

Fig. 3. Mechanical characteristics of a scalar controlled asynchronous electric drive of submersible centrifugal pump: 1 is the mechanical load characteristic with speed indicator x=2; 2 is the mechanical characteristic of the load (centrifugal pump) with a speed indicator x=3; 3 is the synchronous speed in ideal no-load mode; 4 is the point of rated power operation mode of induction mode; 5 is the maximum torque of induction motor; 6 is the mechanical characteristic of constant power mechanism

Моделирование работы электропривода центробежного насоса в динамике

Провести проверку электропривода центробежных насосных установок добычи нефти по тепловому режиму работы теоретически достаточно сложно, так как отсутствует постоянная времени нагрева двигателя и нет обоснованных методик для ее определения. Однако несложно найти потери в двигателе практически во всех его режимах работы, моделируя асинхронный электропривод в программной среде *MatLab-Simulink*.

На рис. 4 приведены графики переходных процессов задания частоты с выхода S-образного задатчика интенсивности в функции времени $f_{\text{зад}}=f(t)$ и графики переходных процессов момента асинхронного двигателя M=f(t) и его скорости $\omega=f(t)$ при пуске на три фиксированные скорости, соответствующие частотам задания: 30, 50 и 60 Гц.

Исследования переходных процессов в асинхронном электроприводе со скалярным регулированием скорости проводились с учетом следующих особенностей электропривода:

- ШИМ-модуляции выходного напряжения инвертора;
- наличия третьей гармоники в кривой предмодуляции напряжения управления инвертором напряжения двухзвенного преобразователя частоты;
- наличия активных и индуктивных сопротивлений проводов инвертора напряжения, кабельных линий на входе и выходе инвертора напряжения;
- падения напряжения в диодах выпрямительного моста и IJBT-транзисторах инвертора;
- нелинейной вольт-частотной характеристики инвертора, аппроксимируемой тремя отрезками прямых линий;
- наличия задержанной отрицательной обратной связи по току двигателя или токовой отсечки.



Рис. 4. Графики переходных процессов задания частоты f_{зад}=f(t), момента асинхронного двигателя ЭДТ110-117 M6 M=f(t), его скорости ∞=f(t) при пуске

Fig. 4. Transients of frequency reference $f_{aa\pi}=f(t)$, torque of induction motor EDT110-117 M6 M=f(t), its speed $\omega=f(t)$ for starting

Для наглядности ШИМ-модуляции инвертора напряжения в схеме имитационной модели электропривода на выходе преобразователя частоты отсутствует выходной синусный фильтр (ВСФ), что не сказывается на достоверности отображения основных процессов в электроприводе, так как асинхронный электродвигатель – инерционное звено второго порядка и сам способен сглаживать колебания скорости в переходных режимах.

Динамические броски момента АД (рис. 4) можно уменьшить, увеличив время пуска электропривода задатчиком интенсивности или применяя для электропривода центробежного насоса системы скалярного управления с отрицательной обратной связью по скорости или системы векторного управления без датчика скорости, а скорость определять с помощью наблюдателей [17–22]. Однако применение последних способов регулирования для улучшения качества переходных процессов момента АД возможно только для ограниченного числа скважинных электроприводов.

Для электропривода центробежного насоса, выполненного в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 2, потребляемую из сети мощность *P*_s можно найти через мгновенные значения фазных токов и напряжений:

$$P_s = i_{1A}u_{1A} + i_{1B}u_{1B} + i_{1C}u_{1C}, \qquad (3)$$

где i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} – мгновенные значения фазных токов асинхронного электропривода; u_{1A} , u_{1B} , u_{1C} – мгновенные значения фазных напряжений электропривода.

Мгновенные значения мощности на валу асинхронного двигателя найдем из выражения

$$P_m = M\,\omega,\tag{4}$$

где M – мгновенное значение момента асинхронного двигателя, найденное по результатам расчета переходных процессов, Н·м; ω – мгновенное значение скорости асинхронного двигателя, рад/с.

Потери мощности в асинхронном двигателе находятся как разность потребляемой мощности электроприводом из сети и мощности на валу асинхронного двигателя:

$$\Delta P = P_s - P_m. \tag{5}$$

Суперблок (Subsystem 3) расчета потерь мощности в асинхронном электроприводе, выполненный в программной среде MatLab-Simulink, вычисляющий мощности по выражениям (3)–(5), приведен на рис. 5. На выходе суперблока установлен осциллограф (Scop 8) для визуального контроля переходных процессов мощности и цифровые индикаторы Loss P1–Loss P3 для точного измерения установившихся значений мощности.



Рис. 5. Суперблок расчета потерь мощности в асинхронном электроприводе

Fig. 5. Superblock for calculating power losses in asynchronous electric drive

Результаты расчета переходных процессов потребляемой из сети мощности асинхронным электроприводом P_s , мощности на валу асинхронного двигателя P_m и мощности потерь ΔP приведены на рис 6.

Анализ графиков рис. 6 показывает, что на начальном участке переходных процессов 0-0,1 с в частотно-регулируемом электроприводе возникают большие потери мощности вследствие заряда конденсатора емкостного фильтра преобразователя частоты. По окончании заряда конденсатора фильтра возможен процесс пуска электропривода. По мере разгона асинхронного двигателя потери мощности ΔP на фиксированных скоростях увеличиваются.



Рис. 6. Переходные процессы потребляемой асинхронным электроприводом мощности из сети Р₅, мощности на валу асинхронного двигателя Рт и потерь в асинхронном двигателе △Р при разгоне и работе двигателя на трех фиксированных скоростях

Fig. 6. Transients of power $P_{\rm s}$ consumed by asynchronous electric drive from the power supply, mechanical power $P_{\rm m}$ on the shaft of induction motor and power losses ΔP in induction motor for its starting and operation with three fixed speed values

Численные значения потребляемой электроприводом мощности P_s , мощности на валу асинхронного двигателя P_m , потери в двигателе ΔP сведены в таблицу. Там же приведены значения коэффициента полезного действия асинхронного двигателя для каждой из фиксированных частот преобразователя частоты.

Таблица. Значения потребляемой электроприводом мощности, мощности на валу асинхронного двигателя, потери в двигателе

 Table.
 Values of power consumed by the electric drive, power on the shaft of the induction motor, power losses in the motor

1110 0114/10	,		, , , power	100000 111	
<i>f</i> _{1<i>i</i>} , Гц (Hz)	30	50	55	57	60
P_s кВт (kW)	26,71	93,19	122,5	137,8	161,3
P_m	25,31	84,86	107,5	118,1	133,5
ΔP	1,4	8,33	15,0	19,7	27,8
η, o.e. (r.u.)	0,947	0,91	0,878	0,857	0,62

Номинальные потери мощности асинхронного двигателя можно найти по паспортным данным из выражения $\Delta P_{\rm H} = P_{\rm H} (1 - \eta_{\rm H}) / \eta_{\rm H}$, для двигателя фирмы АЛНАС типа ЭДТ110–117 Мб они равны $\Delta P_{\rm H} = 20,95$ кВт.

Анализ мощностей, полученных по результатам математического моделирования в программной среде MatLab-Simulink и номинальных потерь ΔP_{μ} в асинхронном двигателе типа ЭДТ110-117 М6, показывает, что рост производительности центробежных насосных установок добычи нефти при частотном регулировании скорости приводного асинхронного двигателя вверх от номинальной скорости увеличением частоты возможно на 10-12 %, но только в электроприводах с завышенной мощностью установленных двигателя и преобразователя частоты. В практических расчетах выбора электродвигателя по мощности в большинстве случаев так и поступают – для механизма выбирают двигатель ближайшей большей мощности из стандартного ряда значений.

Выводы

- Несмотря на то, что статическая механическая характеристика электропривода с частотой напряжения преобразователя 30 Гц является минимально возможной для добычи нефти с помощью погружных насосов, диапазон регулирования скорости в асинхронном электроприводе погружного насоса необходимо расширить до D=1:10 для плавного пуска электропривода.
- Установлено, что для уменьшения ударных моментов при пуске асинхронного частотно регулируемого электропривода темп роста частоты на выходе задатчика интенсивности должен быть увеличен до нескольких десятков секунд даже при пуске на минимальную рабочую скорость электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лабораторное моделирование процесса закачки воздуха высокого давления на месторождениях баженовской свиты / Т.М. Бондаренко, Е.Ю. Попов, А.Н. Черемисин, Е.В. Козлова, И.А. Карпов, Н.В. Морозов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 34–39.
- Планирование, проведение и использование результатов индикаторных исследований для контроля разработки нефтяного месторождения / Б.Г. Ганиев, П.Н. Кубарев, А.Г. Камышников, К.В. Шишкин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 6. – С. 44-47.
- Исследование характеристик электроцентробежного насоса с эжектором на входе при откачке газожикостных смесей / В.С. Вербицкий, К.А. Горидько, А.Э. Федоров, А.Н. Дроздов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 106–109.
- Установки погружных центробежных насосов типа УЭЦН для добычи нефти. Каталог / С.З. Кузьминов, Ю.И. Стариков, В.О. Сухомлинов, В.Н. Филиппов, Р.И. Чуева. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1987. – 216 с.
- Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи. – Омск: Минобрнауки России, 2015. – 160 с.
- Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
- Погружные электродвигатели (ПЭД). URL: http://www.rimera.com/upload/catalog/progruzhnyc-elektrodvig-ped.pdf.com (дата обращения 04.09.2019).
- Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока. – М.: Изд-во «Юрайт», 2019. – 215 с.
- Боловин Е.В., Глазырин А.С. Методы идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 123–131.
- Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов. Справочник. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
- 11. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
- Idir A., Kidouche M. Real-time simulation of V/F scalar controlled induction motor using RT-Lab platform for educational purpose // Proc. of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics. – Venice, Italy, September 28–30, 2013. – P. 189–192.

- 3. Установлено, что неизбежное завышение по мощности асинхронного двигателя для погружного центробежного насоса при его выборе как ближайшего большего из ряда номинальных значений позволяет электроприводу насоса с частотным регулированием скорости работать без перегрева на статических характеристиках выше номинальной.
- Установлено, что в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах увеличение скорости электропривода насоса, как правило, не превышает 10–12 % от номинальной, что позволяет увеличить объем добычи нефти без замены оборудования.

Исследование проводится в Томском политехническом университете в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

- Bilal Akin, Nishant Garg. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors. – Dallas, Texas: Texas Instruments, Inc. Systems and Applications, 2000. – 27 p.
- Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. Scalar control of induction motor drives Using dSPACE DS1104 // Proc. of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics. – Venice, 2013. – P. 322–327.
- Real-time modeling and simulation of an active power filter / S. Beaulieu, M. Ouhrouche, C. Dufour, P.F. Allaire // Proc. of Ninth IASTED International Conference on Power and Energy Systems – PES 2007. – Clearwater, Florida, USA, January 3–5, 2007. – P. 128–133.
- 16. Удут Л.С., Чернышев А.Ю., Гусев Н.В. Разработка и моделирование асинхронных электроприводов со скалярным управлением // Изв. вузов. Электромеханика. – 2015. – № 6 (359). – С. 43–49.
- Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных двигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, В.И. Полищук, С. Халас // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
- Herman I., Vaclavek P. Load torque and moment of inertia observability analysis for alternating current drive sensorless control // IECON Proceedings, Industrial Electronics Conference. – Montreal, Canada, 2012. – P. 1864–1869.
- Binder B.J.T., Pavlov A., Johansen T.A. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation // IFAC-Papers on line. - 2015. -V. 28 (6). - P. 140-146.
- Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, USA, 2017. – Conference Paper № 8002199. – P. 1–8.
- Messaoudi M., Sbita L. Sensorless direct torque and flux control of induction motor based on MRAS and Luenberger observer // International Conference on Green Energy and Conversion Systems. - Hammamet, Tunisia, 2017. - Conference Paper № 8066224. - P. 1-7.
- Online robust estimation of flux and load torque in induction motors / M. Bahloul, L. Chrifi-Alaoui, A.N. Vargas, M. Chaabane, S. Drid // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2017. - V. 94 (5-8). - P. 2703-2713.

Поступила 12.09.2019 г.

Информация об авторах

Чернышева Т.А., старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Аникин В.В., старший преподаватель кафедры автоматизации и робототехники Нижневартовского государственного университета, Россия, 628600, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56; соискатель кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.

Чернышев И.А., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чернышев А.Ю., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. UDC 622-83-52:621.678:622.276.5

VARIABLE SPEED ELECTRIC DRIVE OF CENTRIFUGAL PUMP IN OIL LIFTING PLANTS

Tatyana A. Chernysheva¹,

cherta@tpu.ru

Vasiliy V. Anikin^{2,3}, v-anikin2012@mail.ru

Igor A. Chernyshev¹,

chia@tpu.ru

Aleksandr Yu. Chernyshev¹,

ach@tpu.ru

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

- ² Nizhnevartovsk State University,
 56 Lenin street, Nizhnevartovsk, 628600, Russia.
- ³ Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644000, Russia.

Relevance of the work is caused by the need to create reliable frequency-controlled variable speed asynchronous induction motor drives of centrifugal pumping units for oil lifting.

The main aim of the research is to study the frequency-controlled electric drives of centrifugal pumping units for oil lifting that operate at a speed higher than the nominal (rated) one.

Methods of the research are based on the use of the automatic control theory and simulation in the MatLab – Simulink software environment.

Results. The authors have made up the block scheme for simulation of a scalar frequency-controlled asynchronous induction motor drive of centrifugal pumping units for oil lifting. The scheme takes into account the main features of the real electric drive. The authors calculated mechanical characteristics of the electric drive of the pumping unit and determined the accessible ranges for controlling the speed of the electric drive of the pump unit based on the allowable power losses in steady-state and transient modes.

Findings. Despite the fact that the static mechanical characteristic of an electric drive with ac converter frequency of 30 Hz is the minimum possible for oil lifting using submersible pumps, the range of speed control in an asynchronous induction motor drive of a submersible pump must be expanded to D=1:10 for a soft starting of the electric drive. It was found that in order to reduce high torque when starting an asynchronous frequency-controlled induction motor drive the frequency ramp-up rate at the output of the ramp generator should be several tens of seconds even for starting at the minimum operating speed of the electric drive. It was established that the inevitable power overrating of the induction motor for a submersible centrifugal pump, when it is selected as the closest higher one from a series of nominal values, allows the electric drive of the pump with frequency speed control to work without overheating on static characteristics above the nominal (rated) one. It was found that in frequency-controlled asynchronous induction motor drives the increase in the pump electric drive speed as a rule does not exceed 10–12 % of the nominal (rated) one, which allows increasing oil lifting output without upgrading the electric drive equipment.

Key words:

Centrifugal pumping unit, induction motor, indirect ac power frequency converter, voltage inverter, scalar control, energy loss.

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the grant of the Program of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement.

REFERENCES

- Bondarenko T.M., Popov E.Yu., Cheremisin A.N., Kozlova E.V., Karpov I.A., Morozov N.V. Laboratory modeling of high-pressure air injection in oil fields of Bazhenov formation. *Oil industry*, 2017, no. 3 P. 34–39. In Rus.
- Ganiev B.G., Kubarev P.N., Kamyshnikov A.G., Shishkin K.V. Tracer surveys as a reservoir management tool. *Oil industry*, 2017, no. 6, P. 44-47. In Rus.
- Verbitsky V.S., Goridko K.A., Fedorov A.E. Drozdov A.N. Experimental studies of electric submersible pump performance with ejector at pump inlet when liquid-gas mixture delivering. *Oil industry*, 2016, no. 9, P. 106–109. In Rus.
- Kuzminov S.Z., Starikov Yu.I., Sukhomlinov V.O., Filippov V.N., Chueva R.I. Ustanovki pogruzhnykh tsentrobezhnykh

nasosov tipa UETSN dlya dobychi nefti. Katalog [Submersible centrifugal pumps of ESCP type for oil lifting. Catalogue]. Moscow, Central Institute of Scientific and Technical Information of Chemical and Petroleum Engineering Publ., 1987. 216 p.

- Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. Elektrotekhnologicheskie ustanovki dlya neftedobychi [Electrotechnological installations for oil lifting]. Omsk, Ministry of Education and Science of the Russian Federation Publ., 2015. 160 p.
- Sokolov M.M. Avtomatizirovanny elektroprivod obshchepromyshlennykh mekhanizmov [Automated electric drive of general industrial mechanisms]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 488 p.
- 7. Pogruzhnye elektrodvigateli [Submersible motors]. Available at: http://www.rimera.com/upload/catalog/progruzhnyc-elektrodvig-ped.pdf.com (accessed 4 September 2019).

- Chernyshev A.Yu., Dementev Yu.N., Chernyshev I.A. *Elektroprivod perevennogo toka* [AC electric drive]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 215 p.
- Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Uni*versity. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 1, P. 123-131. In Rus.
- Bobylev A.V. Mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoystva metallov [Mechanical and technological properties of metals]. Moscow: Metalurgiya Publ., 1984. 208 p.
- Shreyner R.T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty [Mathematical modeling of AC drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 654 p.
- Idir A., Kidouche M. Real-time simulation of V/F scalar controlled induction motor using RT-Lab platform for educational purpose. Proc. of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics. Venice, Italy, September 28-30, 2013. pp. 189-192.
- Bilal Akin, Nishant Garg. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors. Dallas, Texas, Texas Instruments, Inc. Systems and Applications, 2000. 27 p.
- Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. Scalar control of induction motor drives Using dSPACE DS1104. Proc. of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics. Venice, 2013. pp. 322–327.
- Beaulieu S., Ouhrouche M., Dufour C., Allaire P.F. Real-time modeling and simulation of an active power filter. *Proc. of Ninth IA-STED International Conference on Power and Energy Systems – PES 2007.* Clearwater, Florida, USA, January 3–5, 2007. pp. 128–133.

- Beaulieu S., Ouhrouche M., Dufour C., Allaire P.F. Real-time modeling and simulation of an active power filter. *Proc. of Ninth IA-STED International Conference on Power and Energy Systems – PES 2007.* Clearwater, Florida, USA, January 3–5, 2007. P. 128–133.
- Udut L.S., Chernyshev A.Yu., Gusev N.V. Development and simulation of scalar-controlled asynchronous electric drives. University News. *Electromechanics*, 2015, no. 6 (359), pp. 43–49. In Rus.
- Herman I., Vaclavek P. Load torque and moment of inertia observability analysis for alternating current drive sensorless control. *IECON Proceedings, Industrial Electronics Conference.* Montreal, Canada, 2012. pp. 1864–1869.
- Binder B.J.T., Pavlov A., Johansen T.A. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation. *IFAC-Papers on line*, 2015, vol. 28 (6), pp. 140-146.
- Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, USA, 2017. Conference Paper № 8002199, pp. 1–8.
- Messaoudi M., Sbita L. Sensorless direct torque and flux control of induction motor based on MRAS and Luenberger observer. International Conference on Green Energy and Conversion Systems. Hammamet, Tunisia, 2017. Conference Paper № 8066224, pp. 1-7.
- Bahloul M., Chrifi-Alaoui L., Vargas A.N., Chaabane M., Drid S. Online robust estimation of flux and load torque in induction motors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 94 (5–8), pp. 2703–2713.

Received: 12 September 2019.

Information about the authors

Tatyana A. Chernysheva, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasiliy V. Anikin, senior lecturer, Nizhnevartovsk State University; postgraduate student, Omsk State Technical University.

Igor A. Chernyshev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr Yu. Chernyshev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.3 385.1

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ГРАНИЦ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРО-УСТЮРТСКОГО РЕГИОНА

Абетов Ауэз Егембердыевич¹,

abetov.auez@mail.ru

Волож Юрий Абрамович²,

yvolozh@yandex.ru

Ниязова Акмарал Темирхановна¹,

niyazova.akma@mail.ru

- ¹ Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, Алматы, ул. Сатпаева, 22.
- ² Институт геологических наук РАН, Россия, г. Москва, 119017, Пыжевский пер., стр. 7.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью наращивания ресурсной базы Республики Казахстан за счет открытия новых месторождении нефти и газа в Северо-Устюртском регионе.

Цель: определение корреляционной связи структурных элементов крупных геоструктур Северо-Устюртского региона.

Объекты: поверхности фундамента и палеозоя, подошвы юрских и меловых отложений Северо-Устюртского региона. **Методы:** переведение в цифровой формат серии структурных карт: по поверхности фундамента, палеозоя, доюрской поверхности, подошве мела Северо-Устюртской региона с помощью программных средств Didger, Surfer, ArcGIS, Geosoft; количественный корреляционный анализ основных геологических границ в программном комплексе COSCAD 3D.

Результаты. В Устюртском регионе по характеру коррелируемости поверхности фундамента и палеозоя, подошвы юрских и меловых отложений выделены три группы геоструктур. В первую группу вошли подвижные складчатые системы и «мобильные углы», в которых коэффициенты корреляции вышеуказанных границ проявляются слабо либо не проявляются вовсе (Южно-Эмбенское поднятие, Арало-Кызылкумский вал, Центрально-Устюртская система дислокации, Горный Мангышлак). Вторую группу формируют внутренние мобильные элементы, обособляющиеся как крупные положительные структуры характеризующиеся экстремально высокими значениями коэффициентов корреляции по поверхности фундамента и палеозоя, подошвы юрских и меловых отложений, (Бузачинский выступ, Актумсукское поднятие, Куаныш-Коскалинский вал, Байчагыр-Яркимбайский свод). Третью группу геоструктур образуют тектонические элементы внутренних районов Северо-Устюртского региона (Северо-Устюртская система прогибов, Челкарская и Барсакельмесская депрессии), характеризующиеся длительным и унаследованным прогибанием в фанерозое и высокой коррелируемостью поверхности фундамента и палеозоя, подошвы юрских и меловых отложений высокой коррелируеское поднятие, Куаныш-Коскалинский вал, Байчагыр-Яркимбайский свод).

Ключевые слова:

Северный Устюрт, поверхность фундамента, поверхность палеозоя, подошва юры, подошва мела, коэффициент корреляции.

Постановка задачи и ретроспективный анализ

Исследования геологического строения Северо-Устюртской впадины сейсмическими методами и бурением начались с середины XX в. и проводились различными организациями Казахстана, Узбекистана, Туркмении, России. Начиная с 2000-х гг. – рядом нефтяных компаний из дальнего зарубежья [1].

Первые сведения о геологии Северного Устюрта были получены в начале 1950-х гг. после проведения сейсмических работ методами отраженных и переломленных волн (МОВ и КМПВ). По результатам интерпретации полученных данных были уточнены старые и выявлены новые структурные элементы, составлены карты тектонического районирования чехла и фундамента [2].

К концу 1960-х гг. Турланской геофизической экспедицией были выполнены региональные работы КМПВ, направленные на изучение нижних горизонтов осадочного чехла и поверхности консолидированной коры. Эти работы позволили определить региональную структуру и характер изменения мощностей палеозойско-триасовых отложений, сделать обоснованные фактическим материалом первые выводы о строении фундамента Устюртского региона [2, 3].

70-е и 80-е гг. прошлого столетия характеризуются значительным ростом объёмов геолого-геофизических работ, интенсивным накоплением данных о структуре, вещественном составе и стратиграфии мезо-кайнозойских и палеозойско-триасовых отложений. В этот период были отработаны региональные и поисковые профили методом общей глубинной точки (МОГТ) [1].

В результате этих работ была выявлена зона нефтегазонакопления на п-ове Бузачи, где в юрских и меловых отложениях последующими работами были выявлены залежи нефти на месторождениях Каламкас, Каражанбас и Северный Бузачи.

К середине 1990-х гг. практически на всей территории Северного Устюрта (в Казахской части) завершена отработка региональной сети сейсмических профилей КМПВ и МОГТ; выполнен большой объем поисковых и детальных сейсмических работ МОГТ по выявлению и подготовке локальных структур в юрско-палеогеновой секции разреза осадочного чехла [4].

Выявлены структуры Акшокы, Зап. Акшокы, Кыземшек, Зап. Кушата, Ю. Акжигит, Азамат, Елигажи, Жалгиз, Зап. Каратюлей, Киндыкты по ОГ «б» (поверхность палеозойских отложений доартинского возраста), а также структуры Мухтар и Коныр по ОГ V1 [4].

В восточной части Северного Устюрта, у границы с Узбекистаном, выполнены поисковые сейсморазведочные работы МОГТ фирмой MSUP (с финансированием из США).

По Самскому прогибу, в том числе и по его северном борту, получены новые дополнительные сведения о геологическом строении. Доюрские отложения этого прогиба отнесены в разряд малоперспективных. При этом сделан вывод о том, что палеозойские отложения могли быть источником углеводородов для юрских отложений.

Более информативный материал, по разрешающей способности, при сейсморазведочных работах получен в 1995–2002 гг. на площадях, где эти исследования выполнялись за счет иностранных инвестиций с наиболее современной аппаратурой. Эти площади отработаны МОГТ-2D Японской национальной нефтяной компании (ЯННК) и расположены на северо-западном побережье Аральского моря (1995–1997 гг.), на акватории Аральского моря (2000–2001 гг.), на площади «Терескен» в зоне сочленения Прикаспийской впадины и Устюрта (1997–1998 гг.) и на соре Кайдак (1999–2000 гг.) [5].

К настоящему времени вся территория Северо-Устюртского региона покрыта региональной сетью сейсмических профилей КМПВ и МОГТ и площадными поисково-детальными исследованиями MOB, а затем, с 1980-х гг., – МОГТ [1].

По результатам выполненных сейсмических исследований и с привлечением данных по геофизическим потенциальным полям установлены основные черты тектоники Устюрта, составлены карты тектонического районирования чехла и фундамента и выделены зоны, перспективные на нефть и газ, охарактеризованы породы фундамента.

Большой вклад в познание геологии и нефтегазоносности Северного Устюрта внесли статьи и монографии А.А. Бакирова, Р.Б. Сапожникова, Н.Я. Кунина, Ю.А. Воложа, З.Е. Булекбаева, А.М. Акрамходжаева, Р.Г. Гарецкого, Р. И. Быкова, В.П. Гаврилова, И.Б. Дальяна, Н.А. Калинина, Л.К. Кирюхина, В.С. Князева, С.М. Оздоева, А.Е. Абетова, В.В. Липатовой, Ю.М. Васильева, И.Г. Гринберга, Г.Х. Дикенштейна, Б.Ф. Дьякова, Н.В. Неволина, Я.М. Огородникова, В.И. Шрайбмана, А.Л. Яншина, Э.С. Воцалевского и др.

Вместе с тем количественный корреляционный анализ основных геологических границ осадочного чехла и консолидированной коры до сих пор не выполнен. В целях изучения структурных особенностей и взаимоотношений структурных поверхностей в программном комплексе COSCAD 3D рассчитан коэффициент корреляции (полный спектрально-корреляционный анализ геоданных) серии структурных карт: по поверхности фундамента, палеозоя, доюрской поверхности, подошве мела Северо-Устюртской региона [6, 7].

Важно отметить, что программное обеспечение COSCAD 3D дает возможность провести полный спектрально-корреляционный и статистический анализ геоданных. Разработано оно в Московском Государственном геологоразведочном Университете под руководством докторов физико-математических наук, профессоров А.А. Никитина и А.В. Петрова.

Картографические материалы, использованные в наших исследованиях, были заимствованы из базы данных Института геологических наук им. К.И. Сатпаева (А.А. Абдулин, Э.С. Воцалевский, С.Ж. Даукеев, 1997) и переведены в цифровой формат с помощью программных средств Didger, Surfer, ArcGIS, Geosoft.

В геологическом строении Северо-Устюртского региона выделяются стабильные глыбы, к которым относятся его внутренние районы и крупные линейно-вытянутые мобильные пояса (Центрально-Устюртская система дислокаций, Горный Мангышлак, Южно-Эмбенское поднятие и Арало Кызылкумский вал), расположенные в периферийных зонах и внутренних «мобильных углах» этого региона [8].

Результаты корреляционные анализа основных границ раздела Северо-Устюртского региона

Центрально-Устюртская система дислокаций. Отчетливо выраженная линейная структура, вытянутая в запад-северо-западном направлении и осложненная валообразными поднятиями и прогибами более высоких порядков [9].

В центральной части этой системы дислокаций поверхность консолидированного фундамента залегает на глубинах 4,0-6,0 км. Поверхность палеозоя, подошва юры и мела залегают здесь конформно фундаменту и с некоторыми вариациями идентифицируются в интервалах глубин 2,5-3,5 км (поверхность палеозоя), 1,8-2,0 км (подошва юрских образований) и 1,2-1,6 км (подошва меловых образований).

Коэффициент корреляции между фундаментом и поверхностью палеозоя повсеместно приобретает высокие значения (до 0,8–0,9).

По поверхности фундамента и подошве юрских образований в западной части Центрально-Устюртской системы дислокаций наблюдается антиформное залегание с коэффициентом корреляции -0,4 - -0,6, на остальной части этой крупной геоструктуры фиксируются высокие значения коррелируемости поверхности фундамента и подошвы юры – до 0,8.

По поверхности фундамента и подошве меловых образований наблюдается схожая картина. В западной части Центрально-Устюртской системы дислокаций выявлены отрицательные значения коэффициента корреляции (до -0,4). На остальной


Рис. 1. График средних значении коэффициентов корреляции внутренних районов Северо-Устюртского региона

Fig. 1. Graph of average values of the correlation coefficients of the internal areas of the North-Ustyurt region



Рис. 2. График средних значении коэффициентов корреляции «мобильных углов» Северо-Устюртского региона

Fig. 2. Graph of average values of the correlation coefficients of the «mobile corners» of the North-Ustyurt region

части этой геоструктуры значения коэффициента корреляции увеличиваются до 0,7.

Бузачинский свод. Выделяется в западном углу Северного Устюрта и имеет продолжение в акваторию Каспийского моря.

На северо-западе Бузачинского свода кровля фундамента прослеживается на глубинах порядка 6,0-7,0 км, погружаясь до 8,0 км в южном и восточном направлениях.

В гипсометрически приподнятых участках этого свода фундамент слабо коррелируется с поверхностью палеозойских образований (0,2), тогда как в южном направлении этот коэффициент увеличивается до 0,6 (рис. 1). Палеозойские комплексы пород здесь широко развиты. В своде Бузачинского поднятия поверхность палеозойских образований залегает на глубинах до 2,5 км и более, погружаясь до 6,5–7,0 км на южной и восточной периклиналях этого поднятия.

Подошва юрских отложений выделяется на глубинах до 0,6 км в северо-западной части Бузачинского свода, погружаясь к югу и востоку до 1,6 км. Диапазон глубин залегания подошвы меловых образований изменяется в пределах 0,6-1,2 км.

Наблюдается хорошая коррелируемость подошвы юрских и меловых отложений с поверхностью фундамента (0,6–0,7) (рис. 2, 3).

Горный Мангышлак. Глубина залегания фундамента здесь повсеместно выдержана и принимает значения 6,0-7,0 км (включая Северо-Каратаусский и Чакырганский прогибы). Поднятия Горного Мангышлака обособляются в форме узких (порядка 20 км) и протяженных (до нескольких сот км) поднятий – мегантиклиналей [10].

Поверхность палеозоя Горного Мангышлака обособляется на глубинах 3,0-4,5 км и выше.

Коэффициенты корреляции фундамента и поверхности палеозоя принимают минимальные значения (от 0,1 до -0,6) на северо-западном и юговосточном флангах. В центральной части Горного Мангышлака фундамент и поверхность палеозоя залегает конформно с высоким коэффициентом корреляции (до 0,8) (рис. 1, 2).

В рельефе подошвы юрских отложений Горный Мангышлак обособляется в виде поднятии по абсолютным отметкам –1,6 – –2,0 км. Коэффициенты корреляции фундамента и подошвы юрских отложений распределяется аналогичным образом. От-



- Рис. 3. Карта поверхности фундамента. Условные обозначения на карте: Тектонические элементы (по поверхности фундамента): 1 – Бузачинское поднятие; 2 – Северо-Каратауская система; 3 – Тюбкараган-Каратауская мегантиклиналь; 4 – Чакырганский прогиб; 5 – Беке-Башкудукская мегантиклиналь; 6 – Кызан-Токубайское поднятие; 7 – Култукская впадина; 8 – Барсакельмесская впадина; 9 – Байчагырский выступ; 10 – Карабаурская мегантиклиналь; 11 – Центрально-Устюртская система; 12 – Жайылганское поднятие; 13 – Самская впадина; 14 – Аманжол-Шелуранский выступ; 15 – Актумсукское поднятие; 16 – Косбулакская впадина; 17 – Арало-Кызылкумская система; 18 – Челкарская впадина; 19 – Аккуловский выступ
- Fig. 3. Map of basement surface. Legend: Tectonic elements (by basement surface): 1 Buzachi uplift; 2 North Karatau system; 3 Tyubkaragan-Karatau meganticlinal; 4 – Chakirgan deflection; 5 – Beke-Bashkuduk meganticlinal; 6 – Kizan-Tokubay uplift; 7 – Kultuk depression; 8 – Barsakelmess depression; 9 – Baychagyr high; 10 – Karabaur meganticlinal; 11 – Central Ustyurt system; 12 – Zhayilgan uplift; 13 – Sams depression; 14 – Amanzhol-Sheluran high; 15 – Aktumsuk uplift; 16 – Kosbulak depression; 17 – Aral-Kyzylkum system; 18 – Chelkar depression; 19 – Akkul high

сутствие корреляции этих границ наблюдается в северо-западной и юго-восточной частях (-0,3 – -0,1), тогда как на остальной территории Горного Мангышлака фиксируются их слабая корреляция (0,2-0,4).

По подошве меловых отложений восточная часть Горного Мангышлака приподнята до 0 км, с погружением в северо-западном направлении до 2,0 км.

Подошва меловых образований залегает неконформно вышеописанным границам раздела и характеризуется отсутствием корреляции, значения которой достигают здесь экстремально высоких величин (до -0.9) (рис. 3), что, в свою очередь, дает основание предполагать о значительной перестройке структурного плана на границе юры и мела.

Южно-Эмбинское поднятие. Разделяет Прикаспийскую впадину и Северо-Устюртский массив и в виде узкой инверсионной структуры простирается в северо-восточном направлении [11].

В осевой части Южно-Эмбинского поднятия поверхность фундамента заглублена до 12,0–13,0 км, тогда как на северном и южном флангах этого поднятия воздымается до глубин 9,0–10,0 км и менее.

В рельефе поверхности палеозойских образований Южно-Эмбинское поднятие обособляется в виде крупного антиклинория с глубиной залегания поверхности палеозойского образования 1,5–4,5 км, на отдельных площадях воздымаясь до 0,5 км.

Поверхности фундамента и палеозойских отложений практически по всей территории Южно-Эмбинского поднятия залегают антиформно и не коррелируются между собой (-0,4 - -0,1).

По глубине залегания подошвы юрских отложений Южно-Эмбинское поднятие условно можно разделить на три района. Наиболее прогнутое положение подошвы юрских образований зафиксировано в центральной части Южно-Эмбинского поднятия (3,0–3,2 км). Отсюда она воздымается до 0,6-2,0 км на его юго-западном фланге и до 1,2-1,6 км, соответственно, на северо-восточном фланге.

Поверхность фундамента с подошвой юрских отложений коррелируется положительными значениями коэффициента (до 0,7), имея лишь в центральной части снижение этого коэффициента до 0,1, что свидетельствует об ослаблении коррелируемости поверхности фундамента и подошвы юрских отложений.

Подошва меловых отложений имеет схожую картину по глубинам залегания. В юго-западной части Южно-Эмбинского понятия она занимает гипсометрически приподнятое положение до 0,6 км, в северо-восточной части принимает промежуточное положение и в центральной части заглублена до 1,4–1,8 км.

Арало-Кызылкумский вал (система поднятий). По поверхности фундамента проявляет себя как крупный полигональный массив с глубиной залегания фундамента до 6,0 км. В рельефе поверхности палеозоя на большей части своего простирания Арало-Кызылкумский вал проявляет себя как поднятие с нечетко выраженной линейной формой и глубиной погружения этой поверхности до 4,5–5,0 км.

Наблюдается уверенная корреляции между поверхностями фундамента и палеозоя (до 0,5–0,7), понижаясь до 0,1 в юго-восточной части этого вала.

Подошва юрских отложений залегает антиформно подстилающим отложениями и обладает трендом углубления в западном направлении от 1,8 до 3,4 км. Арало-Кызылкумский вал в рельефе этой поверхности приобретает четко выраженную линейную форму. Коэффициенты коррелируемсти фундамента с подошвой юрских образований варьируют в диапазоне 0,1–0,6.

Близкая тенденция проявляется в поведении поверхности меловых отложений Арало-Кызылкумского вала, которая также углубляется в западном направлении от 1,6 до 2,4 км [12, 13].

Фундамент с подошвой меловых отложений практически не коррелируется (до –0,1 – –0,4). И только на отдельных площадях на западном и восточном флангах Арало-Кызылкумского вала значения этого коэффициента увеличиваются до 0,5 (рис. 3).

Актумсукская система дислокаций и Куаныш-Коскалинский вал по поверхности фундамента обособляются на глубинах 5,0–7,0 км.

В рельефе поверхности палеозоя проявляют себя как поднятия [13, 14] с гипсометрическими отметками глубин залегания в пределах 3,5–4,0 км. В центральной части Куаныш-Коскалинского вала установлено заглубление поверхности палеозойских образований до 5,0 км.

Коэффициент корреляции между поверхностями фундамента и палеозоя приобретает довольно высокие значения (до 0,6–0,8). В центральной части Куаныш-Коскалинского вала установлено снижение коррелируемости этих поверхностей раздела до 0,1.

По подошве юры Актумсукский вал – это поднятие, обособляющееся в диапазоне глубин 2,2–2,6 км. Куаныш-Коскалинский вал отличается стабильными глубинами залегания подошвы юрских отложений (2,0 до 2,4 км).

Между поверхностью фундамента и подошвой юрских отложений устанавливаются сильные корреляционные связи для Актумсукской системы дислокаций (до 0,7). На Куаныш-Коскалинском валу значения коэффициента корреляции снижаются до 0,5.

По подошве меловых отложений Актумсукская система дислокации обособляется на глубинах 1,6–1,8 км [13], Куаныш-Коскалинский вал – на 1,8–2,0 км [14, 15]. Коэффициент корреляции достигает экстремально высоких значении – 0,7–0,8.

Челкарский прогиб. Обособляется на северовосточном фланге Северо-Устюртского региона. Борта этого прогиба осложнены поднятиями, группами структур, структурными террасами, антиклиналями и брахиантиклиналями [9]. На большей части прогиба глубина залегания фундамента установлена в диапазоне 2,0–3,0 км. В прогибе выделяются две мульды: Кургантузская и Аррадунгская. Кургантузская мульда имеет простое строение и глубину залегания фундамента до 4,0 км. Аррадунгская характеризуется сложным внутренним строением. Поверхность фундамента погружена здесь до глубины 6,0 км [9, 16].

По поверхности палеозоя Челкарский прогиб обособляется по изогипсе –1,5 – –2,0 км. В Аррадунгской мульде установлена его заглубление до 5,0 км. В Кургантузской мульде – до 3,5 км.

Фундамент и поверхность палеозоя в Челкарском прогибе залегает конформно с высоким коэффициентом корреляции (0,6–0,8).

В рельефе подошвы юрских отложений, в бортовых зонах Челкарского прогиба, искомая поверхность выделяется на глубинах 1,0–1,4 км [16]. В депоцентрах этого прогиба она углубляется до 4,0 км в Аррадунгской мульде и до 2,4–2,6 км в Кургантузской мульде [17].

Коррелируемость фундамента с подошвой юрских образований в Челкарском прогибе снижается до 0,4–0,7.

Подошва меловых отложений Челкарского прогиба обособляется на глубинах 0,8–1,2 км, заглубляясь до 2,8 км в Аррадунгской мульде. Отмечается высокая коррелируемость подошвы меловых отложений и фундамента (0,6–0,8).

Барсакельмесский прогиб. По поверхности фундамента представляет собой сложнопостроенную асимметричную структуру с крутым северным и северо-восточным (8,0–9,0 км) и пологим юго-западным (6,0–7,0 км) бортами [18, 19].

По поверхности палеозоя наблюдается тренд заглубления в северном направлении от 4,0 до 6,5 км. Коэффициенты корреляции достигают экстремально высоких значений – 0,8–0,9.

В рельефе подошвы юрских отложений большая часть Барсакельмесского прогиба обособляется в виде депрессии, ориентированной в северовосточном (3,0-3,6 км) направлении, тогда как в западной, бортовой части наблюдается воздымание подошвы юрских отложений (2,4 км).

На большей части Барсакельмесского прогиба фиксируются высокие значения коэффициентов корреляции фундамента и подошвы юрских отложений (0,6–0,8). Исключение представляют его западная и юго-восточная части, где эти границы не коррелируются (коэффициенты корреляции снижаются до -0,4 - -0,1).

Тренд заглубления в северо-восточном направлении наблюдается и по подошве меловых отложении (1,8–2,4 км) [19]. Значения коэффициента корреляции между фундаментом и подошвой мела во внутренних районах прогиба достигают здесь экстремально высоких величин (до 0,8–0,9), понижаясь до -0,2 в западной и юго-восточной частях.

Байчагыр-Яркимбайский свод. Крупный положительный элемент, ограничивающий Барсакельмесский прогиб с запада и обладающий массивной конфигурацией и незначительным развитием структурных осложнений в осадочном чехле [20].

На большей части этого свода поверхность фундамента погружается к северу от 4,0 до 6,0 км.

В рельефе поверхности палеозойских образований Байчагыр-Яркимбайский свод обособляется на глубинах 3,0-3,5 км.

Поверхности фундамента и палеозойских отложений практически по всей территории этого свода залегают конформно и хорошо коррелируются между собой со значениями коэффициентов корреляции 0,6–0,8.

Подошва юрских отложений Байчагыр-Яркимбайского свода воздымается в северо-восточном направлении от 2,2 до 3,0 км [21].

Установлена высокая коррелируемость фундамента с подошвой юрских отложений (до 0,7–0,8). И только в западной части Байчагыр-Яркимбайского свода наблюдается снижение коррелируемости этих поверхностей до 0,1.

Подошва меловых отложений имеет схожий тренд коррелируемости с поверхностью фундамента. В юго-западной части Байчагыр-Яркимбайского свода она занимает гипсометрически приподнятое положение (до 1,2 км), в северо-восточной части заглублена до 1,8 км. Коэффициент корреляции здесь приобретает высокие значения (до 0,6–0,8), и только на северо-восточном фланге этого свода значения этого коэффициента снижаются до –0,1.

Северо-Устюртская система прогибов образована Самским и Косбулакским прогибами и Култукской впадиной. Эта система прогибов характеризуется глубоким погружением фундамента (до 10,0–12,0 км и более) [22].

К югу, по сложной системе крупноамплитудных разломов [23], поверхность фундамента резко воздымается до глубин 7,0–8,0 км в Кызан-Токубайском поднятии и до 6,0–7,0 км в Актумсукской системе дислокаций.

К северу в рельефе поверхности фундамента этой системы прогибов отсутствует физическая граница с Южно-Эмбенским поднятием (12,0-13,0 км).

В рельефе поверхности палеозойских отложений Косбулакский и Самский прогибы обособляются на глубинах 5,5–6,5 и 6,5–7,5 км, соответственно, и Култукской впадине до 7,0–8,0 км.

В Северо-Устюртской системе прогибов наблюдаются высокие значения коэффициента корреляции поверхности фундамента и палеозоя (до 0,8), который снижается к границе с Южно-Эмбинским поднятием до 0,1.

Подошва юрских отложений на большей части Северо-Устюртской системы прогибов обособляются на глубинах 3,6-4,2 км. Коэффициенты корреляции между поверхностью фундамента и подошвой юрских отложений приобретают высокие значения (до 0,7), в некоторых местах достигая максимума (0,9).

В рельефе подошвы меловых отложений эта система прогибов обособляются на глубинах

1,8–3,0 км. Наблюдаются высокие значения коэффициентов корреляции – до 0,8– 0,9.

Заключение

Проведенные исследования по выявлению корреляционных связей структурных элементов в пределах крупных геоструктур Северо-Устюртского региона дают основания для формулирования следующих выводов.

В линейно-вытянутых подвижных системах и «мобильных углах» коррелируемость поверхности фундамента и палеозойских образований, подошвы юрских и меловых отложений проявляется слабо либо не проявляется вовсе. Здесь эти границы раздела зачастую залегают антиформно.

К примеру, Арало-Кызылкумская система поднятий в структуре поверхностей фундамента и палеозоя проявляет себя как вал, тогда как в строении юрских и меловых комплексов пород обособляется как погруженная депрессия.

Южно-Эмбенское поднятие в структуре отложений верхнего палеозоя и мезозоя-кайнозоя представляет собой вал, тогда как в рельефе по-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаджанов Т.Л., Кунин Н.Я., Лук-Зильберман В.И. Строение и нефтегазоносность глубокопогруженных комплексов Средней Азии по геофизическим данным. – Ташкент: Фан, 1986. – 190 с.
- Неволин Н.В. Тектоника Устюрта // Геология нефти и газа. 1958. – № 07. – С. 12–18.
- Особенности строения палеозойских отложений Тургайско-Сырдарьинского и Устюртского регионов (в связи с перспективами нефтегазоносности глубоких горизонтов осадочного чехла) / Ю.А. Волож, В.А. Быкадоров, М.П. Антипов, Р.Б. Сапожников // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – Т. 11. – № 4. – С. 1–43.
- Ли Юн Хун. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности юго-восточного борта Прикаспийской впадины и ее обрамления. – М.: МГУ, 2006. – 152 с.
- Кан В.П., Тропп Е.Б. Глубинное строение северо-восточной части Южно-Эмбинского поднятия в свете новейших сейсмических данных // Геология нефти и газа. – 1996. – № 5. – С. 7–17.
- Taylor R. Interpretation of correlation coefficient: a basic review // SAGE journals. – 1990. – V. 6. – Р. 35–39. URL: https://doi.org/ 10.1177/875647939000600106 (дата обращения 30.10.2019).
- Gogtay N.J., Thatte U.M. Principles of correlation analysis // Journals of the Association of Physicians of India. - 2017. -V. 65. - P. 78-81.
- Кунин Н.Я., Сапожников Р.Б. К вопросу о тектонике, перспективах нефтегазоносности и природе магнитных и гравитационных аномалий Южно-Эмбинского района // К проблеме связи Урала и Тянь-Шаня. 1969. № 4. С. 10–17.
- Парагульгов Х.Х., Куанышев М.А., Фазылов Е.М. Особенности строения и перспективы нефтегазоносности северо-востока Аральского бассейна // Известия НАН РК. – 2008. – № 6. – С. 70–79.
- Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М.: МГУ, 1996. 448 с.
- Нефтегазоносность Северо-Устюртской впадины / А.М. Акрамходжаев, И.Г. Гринберг, В.Г. Сухинин, Ж.Ю. Юлдашев, А.А. Валиев. – Ташкент: Фан, 1974. – 81 с.

верхности фундамента проявляет себя как глубокий прогиб.

Конформное залегание поверхности фундамента и палеозоя и подошвы юрских отложений в виде выступов выявлено в Центрально-Устюртской системе дислокаций, центральной части Горного Мангышлака [24, 25]. Подошва меловых отложений не коррелируется или слабо коррелируется с вышеописанными границами раздела.

Исключение составляют Бузачинский выступ, Актумсукское поднятие, Куаныш-Коскалинский вал и Байчагыр-Яркимбайский свод, характеризующиеся экстремально высокими значениями коэффициентов корреляции, проявляют себя как крупные положительные структуры по всем анализируемым границам раздела.

Внутренние районы Северо-Устюртского региона (Северо-Устюртская система прогибов, Челкарская и Барсакельмесская депрессии), характеризуются длительным и унаследованным прогибанием в фанерозое, наблюдается прогнутое положение поверхности фундамента и палеозоя, подошвы юры и мела с высокими значениями коэффициента корреляции.

- Жолтаев Г.Ж., Исказиев К.О., Абайылданов Б.К. Палеозойские отложения потенциальный резерв восполнения запасов и расширения сырьевой базы нефтегазовой отрасли на Мангышлаке // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2018. Т. 431. № 5. С. 163–171. URL: https://doi.org/10.32014/2018.2518–170X.22 (дата обращения 30.10.2019).
- 13. Абетов А.Е., Ниязова А.Т., Саурыков Ж.Ж. Объемное моделирование точек Эйлера для геоплотностных и геомагнитных моделей Северо-Устюртского региона в программном пакете Geosoft Oasis Montaj // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. – 2017. – № 6. – С. 171–177.
- Палеогеография и геодинамика Казахстана и сопредельных территорий / Б.С. Ужкенов, А.К. Мазуров, В.А. Быкадоров, А.В. Смирнов, О.А. Федоренко // Доклады казахстанских геологов на МГК-32. – Алматы, 2004. – С. 39–54.
- Жолтаев Г.Ж., Абилхасимов Х.Б. Седиментационные модели и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений Прикаспийской синеклизы и Устюрта. – Алматы: Казахстанское геологическое общество «КазГЕО», 2004. – 473 с.
- 16. Консолидированная кора Каспийского региона: опыт районирования / Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож, М.П. Антипов, В.А. Быкадоров, Т.Н. Хераскова. – М.: ГИН РАН, 2010. – 63 с.
- Карта альпийской тектоники Казахстана / Б.С. Ужкенов, Р.М. Антонюк, В.А. Быкадоров, Ю.А. Волож. – Алматы: Комитет геологии Казахстана, 2012. – ххх с.
- Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана / С.Ж. Даукеев, Э.С. Воцалевский, Д.А. Шлыгин, В.М. Пилифосов. – Алматы: Нефть и газ, 2002. – 248 с.
- Пейве А.В., Марков М.С., Меннер В.В. Проблемы региональной тектоники Евразии. – М.: Академия наук СССР, Геологический институт, 1963. – Вып. 92. – ххх с.
- Строение и нефтегазоносность палеозойских отложений Устюрта / Ю.А. Волож, В.А. Быкадоров, М.П. Антипов, В.С. Парасына, В.В. Рыбальченко // Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 85–97.
- Thompson D.T. EULDPH: a new technique for making computerassisted depth estimates for magnetic data // Geophysics. – 1982. – V. 47. – P. 31–37.

 Hood P. Gradient measurements in aeromagnetic surveying // Geophysics. - 1965. - V. XXX. - P. 891-902.
 Reid A.B., Allsop J.M., Grancer H. Magnetic interpretation in

three dimensions using Euler deconvolution // Geophysics. -

- Алиев И.М., Аржевский Г.А., Григоренко Ю.Н. Нефтегазоносные провинции СССР: справочник. – М.: Недра, 1983. – 272 с.
- 25. Таль-Вирский Б.Б. Геофизические поля и тектоника Средней Азии. М.: Недра, 1982. 200 с.

Поступила 14.11.2019 г.

Информация об авторах

1990. - V. 55. - P. 80-90.

Абетов А.Е., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева.

Волож Ю.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологических наук РАН.

Ниязова А.Т., докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева.

UDC 550.3 385.1

CORRELATION ANALYSIS OF THE MAIN BOUNDARIES OF A SEDIMENTARY COVER OF THE NORTH-USTYURT REGION

Auez E. Abetov¹,

abetov.auez@mail.ru

Yuriy A. Volozh²,

yvolozh@yandex.ru

Akmaral T. Niyazova¹,

niyazova.akma@mail.ru

¹ Kazakh National Research Technical University named after K. Satpaev, 22, Satpaev street, Almaty, 050013, Kazakhstan.

² Institute of Geological Sciences of RAS,

7, Pyzhevskiy street, Moscow, 119017, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to increase the resource base of the Republic of Kazakhstan for discovery of new oil and gas fields in the North-Ustyurt region.

The main aim of the research is to determine the correlation of structural elements of major geostuctures of North Ustyurt region. **Object:** surface of the basement and Paleozoic, pre-Jurassic surface and Crateceous base of the North Ustyurt region.

Methods: conversion to digital format a series of structural maps: by the surface of the basement, Paleozoic, pre-Jurassic surface and Crateceous base of the North-Ustyurt region using Didger, Surfer, ArcGIS, Geosoft software tools; quantitative correlation analysis of the main geological boundaries in the COSCAD 3D software package.

Results. The authors have singled out three groups of geostructures in the Ustyurt region by the nature of correlation of the surface of the basement and paleozoic, the bottom of the Jurassic and Cretaceous sediments. The first group includes mobile fold systems and «mobile corners», in which the correlation coefficients are weak, either do not appear at all (South Emba uplift, Aral-Kyzylkum arch, Central Ustyurt dislocation system, Mountain Mangyshlak). The second group is formed by internal mobile groups, isolated as large positive structures characterized by extremely high values of correlation coefficients by surface of the basement and paleozoic, the bottom of the Jurassic and Cretaceous sediments (Buzachi uplift, Aktumsuk high, Kuanish-Koskala arch, Baychagyr-Yarkimbay high). The third group of geostructures is formed by tectonic elements of the inner areas of the North-Ustyurt region (North-Ustyurt depression systems, Chelkar and Barsakelmess depressions), characterized by prolonged and inherited subsidence in the Phanerozoic and high correlation surface of the basement and Paleozoic, the bottom of the Jurassic and Cretaceous sediments are bottom of the Jurassic and Cretaceous sediments are by prolonged and inherited subsidence in the Phanerozoic and high correlation surface of the basement and Paleozoic, the bottom of the Jurassic and Cretaceous sediments.

Key words:

North Ustyurt, basement, Paleozoic, Jurassic, cretaceous, correlation coefficient.

REFERENCES

- Babadzhanov T., Kunin N., Luk-Zilberman V. Stroenie i neftegazonosnost glubokopogruzhennykh kompleksov Sredney Azii po geofizicheskim dannym [Structure and oilness of deep complexes of Central Asia by geophysical data]. Tashkent, Fan Publ., 1986. 190 p.
- Nevolin N. Tectonika Ustyura [Tectonic of Ustyurt]. Oil and gas geology, 1958, no. 7, pp. 12–18.
- Volozh Yu., Bykadorov V., Antipov M., Sapozhnikov R. Osobennosti stroeniya paleozoiskikh oltozheniy Turgaisko-Sirdarinskogo i Ustyurtskogo regionov (v svyazi s perspektivami neftegazonosnosti glubokikh gorizontov osadochnogo chekhla) [Structural features of the Paleozoic deposits of the Turgay-Syrdarya and Ustyurt regions (due to the oil and gas potential of the deep horizons of the sedimentary cover)]. Oil and gas Geology. Theory and Practice, 2016, vol. 4, pp. 1–43.
- Li Yun Khun. Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti yugo-vostochnogo borta Prikaspiyskoy vpadiny i ee obramleniya [Geological structure and oil and gas perspectivity of southeastern part of Precaspian depression and its frames]. Moscow, MSU Publ., 2006. 152 p.
- Kan V., Tropp Ye. Glubinnoe stroenie severo-vostochnoy chasti Yuzhno-Embinskogo podnyatiya v svete noveyshikh seysmicheskikh dannykh [Deep structure of north-east part of South Emba uplift in new seismic data]. *Oil and gas geology*, 1996, no. 5, pp. 7–17.

- Taylor R. Interpretation of Correlation Coefficient: a basic review. SAGE journals, 1990, vol. 6, pp. 35-39. Available at: https://doi.org/10.1177/875647939000600106 (accessed 30 October 2019).
- Gogtay N.J., Thatte U.M. Principles of correlation analysis. Journals of the Association of Physicians of India, 2017, vol. 65, pp. 78-81.
- Kunin N., Sapozhnikov R. K voprosu o tektonike, perspektivakh neftegazonosnosti i prirode magnitnykh i gravitatsionnykh anomaliy Yuzhno-Embinskogo rayona [To the issue of tectonic, oil and gas perspectivity and nature of magnetic and gravity anomalies of South Emba area]. K probleme svyazi Urala i Tyan-Shanya, 1969, no. 4, pp. 10–17.
- 9. Paragulgov Kh., Kuanishev M., Fazilov E. Feature of the structure and oil and gas perspectivity of north-east of Aral basin. *News of NAS RK*, 2008, vol. 6, pp. 70–79. In Rus.
- Milanovskiy E. Geologiya Rossii i blizhnego zarubezhya (Severnoy Evrazii) [Geology of Russia and neighbour foreign (North Eurasia)]. Moscow, MSU Publ., 1996. 448 p.
- Akramkhodzhaev A., Grinberg I., Sukhinin V., Yuldashev Zh., Valiev A. Neftegazonosnost Severo-Ustyurtskoy vpadiny [Oil and gas of North Ustyurt depression]. Tashkent, Fan Publ., 1974. 81 p.
- 12. Zholtaev G., Iskaziev K., Abayildanov B. Paleosoic deposits as option for reserves replacement and expansion of raw material base for the petroleum industry in Mangyshlak. *News of the National*

Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences, 2018, vol. 5, no. 431, pp. 163–171. In Rus. Available at: https://doi.org/10.32014/2018.2518–170X.22 (accessed 30 October 2019).

- Abetov A., Niyazova A., Saurikov Zh. 3D Modeling of Euler's points for Geodensity and Geomagnetic models of North Ustyurt region in Geosoft Oasis Montaj software. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences, 2017, vol. 6, no. 426, pp. 171–177. In Rus.
- 14. Uzhkenov B., Mazurov A., Bykadorov V., Smirnov A., Fedorenko O. Paleogeografiya i geodinamika Kazakhstana i sopredelnykh territoriy [Paleogeography and geodynamics of Kazakhstan and adjacent territories]. Doklady kazakhstanskhikh geologov na MGK-32 [Reports of Kazakhstan geologists at MGK-32]. Almaty, 2004. pp. 39–54.
- 15. Zholtaev G., Abilkhasimov Kh. Sedimentatsionnie basseiny i perspektivy neftegazonosnosti paleozoiskikh otlozheniy Prikaspiiskoy sineklizy i Usturta [Sedimentation models and oil and gas prospects of the Paleozoic sediments of the Caspian syneclise and Ustyurt]. Almaty, Kazakhstan Geological Society «KazGEO» Publ., 2004. 473 p.
- Leonov Yu., Volozh Yu., Antipov M., Bykadorov V., Kheraskov T. Konsolidirovannaya kora Kaspiyskogo regiona: opyt rayonirovaniya [Consolidated crust of the Caspian region: zoning experience]. Moscow, GIS RAS Publ., 2010. 63 p.
- Uzhkenov B., Antonyuk R., Bykadorov V., Volozh Yu. Karta alpiyskoy tektoniki Kazakhstana [Map of Alpian tectonic of Kazakhstan]. Almaty, Committee of geology of Kazakhstan Publ., 2012. xxx p.

- Daukeev S.Zh., Vocalevskiy E.S., Shlygin D.A., Pilifosov V.M. Glubinnoe stroenie i mineralnye resursy kazakhstana [Deep structure and mineral resources of Kazakhstan]. Almaty, Neft i gaz Publ., 2002. Vol. 3, 248 p.
- Peive A., Markov M., Menner V. Problemy regionalnoy tektoniki Evrazii [Problems of regional tectonic of Eurasia]. Moscow, Academy of sciences of USSR, Institut of geology Publ., 1963. Iss. 92, xxx p.
- Volozh Yu., Bykadorov V., Antipov M., Parasina V., Rybalchenko V. Structure and oilness of Paleozoic sediments of Ustyurt. Oil and Gas, 2013, vol. 5, pp. 85–97. In Rus.
- Thompson D.T. EULDPH: a new technique for making computerassisted depth estimates for magnetic data. *Geophysics*, 1982, vol. 47, pp. 31-37.
- Hood P. Gradient measurements in aeromagnetic surveying. Geophysics, 1965, vol. XXX, pp. 891-902.
- Reid A.B., Allsop J.M., Grancer H. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 199, vol. 55, pp. 80-90.
- Aliyev I.M., Arzhevsky G.A., Grigorenko Yu.N. Neftegazonosnye provintsii SSSR [Oil and gas provinces of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 272 p.
- Tal-Virsky B.B. Geofizicheskie polya i tektonika Sredney Azii [Geophysical fields and tectonics of Central Asia]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 200 p.

Received: 14 November 2019.

Information about the authors

Auez E. Abetov, Dr. Sc., professor, head of Geophysics department, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev.

Yuriy A. Volozh, Dr. Sc., senior researcher, Institute of Geological Sciences of RAS.

Akmaral T. Niyazova, doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev.

УДК 543.422.6:543.426

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНТРОЛЯ СОСТАВА ПЛАЗМЫ И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ТЕХНОЛОГИИ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Тюрин Юрий Иванович¹,

tyurin@tpu.ru

Ван Яомин¹,

jldxwym@mail.ru

Сыпченко Владимир Сергеевич¹,

sypchenkov@mail.ru

Никитенков Алексей Николаевич¹,

nik@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Надежность и целостность нефтедобывающего оборудования, сроки его эксплуатации обеспечиваются комплексом мер по борьбе с коррозией, в частности использованием технологий газопламенного напыления защитных покрытий на проектируемые или восстанавливаемые детали. В данных технологиях эффективным методом контроля за состоянием состава плазмы и качества напыляемой поверхности может служить явление гетерогенной хемилюминесценции. Гетерогенные хемилюминесцентные реакции обладают селективностью и высокой чувствительностью к типу поверхности и сорту возбуждающего газа. Использование оптических методов для изучения, контроля и управления в неравновесных системах газ-твердое тело открывает новые аналитические и аппаратурные возможности в физике поверхности, химии, плазмохимии, технологии полупроводников и люминофоров, в решении экологических проблем. Изучение процессов адсорбции-десорбции, диссоциации, диффузии, рекомбинации газовых частиц, дефектообразования и роста кристаллической решетки с использованиея явления гетерогенной хемилюминесценции является актуальной задачей физики конденсированного состояния. Поскольку явление гетерогенной хемилюминесценции реализует возможности осуществления селективных экспресс-методов анализа при простом аппаратурном оснащении с пределом обнаружения свободных атомов, радикалов, примесей в газовой фазе и в составе поверхностных слоев конденсированных сред до 10⁻⁶ % (мол).

Цель: исследование процессов в неравновесных системах газ – твердое тело и определение параметров этого взаимодействия на основе регистрации характеристик гетерогенной хемилюминесценции; разработка нестационарных методов определения параметров взаимодействия газ – твердое тело с использованием явления гетерогенной хемилюминесценции, контроль параметров газовой среды и состояния поверхности конденсированных сред.

Объекты: атомно-молекулярные пучки водорода, кристаллофосфор ZnS⁻Mn²⁺, приповерхностные области взаимодействия газ - твердое тело.

Методы: методы, основанные на явлении гетерогенной хемилюминесценции в атомарном водороде для определения скоростей адсорбции и рекомбинации атомов H, десорбции молекул H₂, энергии активации десорбции молекул водорода с поверхности ZnS⁻Mn²⁺. Методом «темновой» паузы определена скорость рекомбинации адсорбированных атомов водорода по механизму Лэнгмюра⁻Хиншелвуда.

Результаты. Выполнено сравнительное исследование люминесценции ZnS¬Mn²⁺ при возбуждении светом (фотолюминесценции) и атомарным водородом (гетерогенной хемилюминесценции). Изучены спектрально-кинетические характеристики люминесценции. Установлены механизмы и параметры взаимодействия атомов водорода с поверхностью сульфида цинка (сечения, частотные факторы, энергии активации) с использованием спектрально-кинетических характеристик гетерогенной хемилюминесценции. Показано, что люминофор ZnS¬Mn²⁺ может служить экспресс датчиком восстановительной компоненты плазмы (водород). Явление гетерогенной хемилюминесценции составляет основу оперативных методов контроля начальных стадий модификации поверхности твердых тел в процессах пучково-плазменной обработки материалов.

Ключевые слова:

Нефтегазовое оборудование, коррозия, защитные покрытия, газоплазменное напыление, фотолюминесценция, гетерогенная хемилюминесценция, поверхность, атомы водорода, нестационарные процессы, взаимодействия атомов водорода с поверхностью.

Введение

Увеличение сроков службы нефтедобывающего оборудования во многом определяется комплексом мер для борьбы с коррозией металла при его физико-химическом взаимодействии с окружающей средой [1]. Повышение ресурса оборудования и сооружений может быть достигнуто использованием технологий газоплазменного напыления защитных покрытий на поверхность защищаемых или восстанавливаемых деталей [2]. Эффективным методом контроля состава плазмы и качества напыляемой поверхности может служить явление гетерогенной хемилюминесценции (ГХЛ) [3].

Хемилюминесценция продолжает оставаться областью активных исследований [4], что связано с разнообразием её практических применений. Яв-

ление ХЛ заключается в прямом преобразовании энергии возбужденных состояний, образованных свободными атомами и промежуточными радикалами, в электромагнитное излучение [5–10]. Возбужденные частицы могут дезактивироваться и при передаче энергии люминофорам с относительно высоким квантовым выходом [10]. Тем самым ХЛ служит основой перспективной техники с повышенной надежностью, быстрым откликом, экономически эффективным инструментарием и простым управлением [11]. ХЛ с повышенными пределами обнаружения [10, 12] становится чувствительным аналитическим методом [12–20].

Среди многочисленных направлений исследования ХЛ систем быстро развивающейся областью стала гетерогенная хемилюминесценция (ГХЛ) [3, 21]. ГХЛ возбуждается в актах рекомбинации свободных атомов тепловой энергии на поверхности люминофоров. Свободные атомы взаимодействуют с самым первым слоем поверхности. Выделяющаяся энергия рекомбинации (H+H \rightarrow H₂ 4,5 эВ, O+O \rightarrow O₂ 5,12 эВ, N+N?N₂ 9,5 эВ) передается непосредственно поверхностным и приповерхностным центрам свечения (10–40?) и приводит к избирательному возбуждению люминесценции приповерхностной области.

Распространение методов ГХЛ на газовую фазу с твердофазной диагностикой и обнаружением связано с высокой интенсивностью сигналов, селективностью и другими уникальными свойствами ГХЛ [21, 22]. Реализованы способы определения концентрации свободных атомов H, O, N, а также молекул SO_2 , CO_2 в вакууме и газах по интенсивности ГХЛ детектора. Подбором селективного кристаллофосфора-излучателя для данной смеси газов удается достичь уровней интенсивности ГХЛ, дающих соотношение свечения анализируемой примеси к фону, равное 10² и более [22–28]. Метод эффективен для определения SO₂ в газовых смесях, находящихся при пониженных давлениях, а также для анализа воздуха при относительно больших концентрациях SO₂, например, в отходящих газах металлургических производств [26, 27]. Предел обнаружения SO₂ равен (10⁻²-10⁻⁴) % мол или $10^{\mbox{--2}}\,\mbox{мr/m^3},$ люминофор $Y_2O_2S{--Eu}.$ В случае CO, атмосферы интервал определения концентраций может быть расширен от 5.10-3 до 50 % мол. Предельная обнаруживаемая относительная концентрация CO₂ составляет 10⁻³ % мол, люминофор CaCO₃-Bi [22, 28]. АО «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург, разработало серию газоанализаторов, аттестованных в уполномоченной организации при Агентстве по охране окружающей среды США (ЕРА) и одобренных ЕРА в качестве средств измерения озона для задач мониторинга атмосферного воздуха, промышленных газовых выбросов, воздуха рабочей зоны, транспортных (автомобильных) выбросов, технологических газовых смесей. В основу работы анализаторов положен эффект гетерогенной хемилюминесценции, возникающей в результате реакции O₃, H₂S, SO₂, NO, NO₂, NH₃, CO, CO₂ с окисляемыми химическими веществами композиции [29].

Полупроводниковый материал ZnS является прямозонным соединением группы AII-BVI [30, 31] с оптической шириной запрещенной зоны 3,41–3,91 эВ. Сульфид цинка используется для создания люминофоров ZnS–Ag с синим цветом свечения ZnS–Ag 450, (Zn,Cd)S–Ag 5 – кинескопы, и рентгеновские трубки с зелёным цветом свечения. Соединения ZnS–Cu – используются для светящихся табло, панелей, как люминофоры трубок осциллографов, в ультрафиолетовых светодиодах, как эффективные люминофоры на плоских дисплеях, в фотоэлектрических устройствах. ZnS–Mn²⁺ оранжевый, ZnS–Mn²⁺, Te²⁺ (750 нм) и ZnS–Sn²⁺, (715 нм) красный и т. д. [32, 33].

Настоящая статья посвящена исследованию ГХЛ ZnS-Mn²⁺. Люминофор ZnS-Mn²⁺ имеет потенциальное применение в полевых эмиссионных устройствах (FED) [34]. Легированные полупроводниковые наночастицы ZnS-Mn²⁺ используются в качестве люминофоров, а также в тонкопленочных электролюминесцентных устройствах [35]. Эффективность свечения люминофоров увеличивается с уменьшением размера частиц, и люминесцентные материалы на основе ZnS используются в дисплеях приборов в качестве датчиков, в лазерах и т. д. [36, 37]. ГХЛ облегчает быструю идентификацию и обнаружение широкого класса соединений с применением высокоэффективных твердотельных люминофоров, к которым относится ZnS-Mn²⁺.

Среди люминесцентных методов изучения элементарных актов взаимодействия газ-поверхность следует выделить исследования, основанные на нестационарных измерениях [38]. В их основе лежит регистрация люминесцентного отклика системы на изменение одного из внешних параметров: плотность потока атомов и молекул, температура образца, темновая пауза, фотоподсветка и пр., определяющих интенсивность ГХЛ. С одной стороны, изменение внешних параметров должно быть осуществимо экспериментально, а с другой чтобы их изменение приводило к такому люминесцентному отклику, по характеру которого удавалось бы определять параметры процессов взаимодействия газ – твердое тело. Спектр люминесценции несет наиболее детальную информацию о структуре центра свечения и его ближайшем окружении. ГХЛ связана с возбуждением приповерхностной области кристалла атомами и молекулами тепловой энергии. Симметрия кристаллического поля и колебательный спектр поверхности отличаются от объемных. Это приводит к различию спектров при оптическом и химическом способах возбуждения. Дополнительные изменения в спектрах поверхностной люминесценции обусловлены деформацией (перестройкой) решетки и существованием специфических поверхностных центров свечения.

Сравнительное исследование спектров ГХЛ и фотолюминесценции (ФЛ) служит информатив-

ным методом изучения механизмов возбуждения ГХЛ получения сведений:

- о параметрах и динамике кристаллической решетки;
- структуре и пространственном распределении центров свечения, примесей и дефектов;
- процессах изменения свойств поверхности при воздействии активных газов;
- изменении симметрии кристаллического поля при переходе от объема к поверхности;
- частотах колебаний поверхностных мод кристалла и локальных колебаний адсорбата и пр. Выбор активатора, служащего спектроскопиче-

высор активатора, служащего спектроскопическим зондом, определяется целью исследований. Ионы с незаполненными d-оболочками (Mn^{2+}), сильно взаимодействующие с решеткой, могут служить индикаторами динамических свойств поверхности. Ионы, способные образовывать центры свечения при ассоциации с со активаторами, вакансиями или при сегрегации примеси, позволяют судить о перераспределении введенных в образец атомов активатора с температурой и изменении состава поверхности в атмосфере активного газа. Спектроскопическим зондом может выступать и сама адсорбированная частица.

Техника эксперимента

Установка для измерения спектрально-кинетических характеристик люминесценции кристаллофосфоров при разных условиях и способах возбуждения, в том числе пучком атомарного водорода, разработана и изготовлена в отделении экспериментальной физики инженерной школы ядерных технологий Томского политехнического университета и подробно описана в [38].

Установка состоит из следующих основных частей:

- вакуумная часть;
- система нагрева и контроля температуры;
- источник особо чистого молекулярного и атомарного водорода (высокочастотный генератор плазмы);
- система подачи газа;
- системы регистрации интенсивности свечения;
- системы колориметрической и люминесцентной регистрации атомав Н.

Предельное остаточное давление в системе ~10⁻⁶ торр; рабочее давление определяется скоростью напуска газа (через натекатель марки DFDZ-750) в высокочастотный (ВЧ) генератор плазмы и составляет 1–10⁻³ торр.

Атомарный водород, взаимодействующий с поверхностью образца, получается с помощью без электродного емкостного высокочастотного разряда в молекулярном водороде (ВЧ-генератора УВЧ 30-2). Для определения изменений концентрации атомов водорода в вакуумной ячейке использован метод изотермического калориметра с мостом Уинстона с вольфрамовой нитью в качестве прецизионного датчика в плече [39].

Молекулярный водород получается электролизом дистиллированной воды в генераторе водорода и кислорода (ГВЧ-12М1). Используемый в ГВЧ-12М1 метод очистки водорода основан на использовании нанотехнологических полимерных мембран, селективно проницаемых по водороду. Водород хранится в баллонах и напускается в камеру по системе для напуска газа. Скорость напуска газа контролируется управляющим компьютером.

Результаты и обсуждение

Спектры люминесценцииZnS-Mn2+

ZnS-Mn²⁺. В решетку ZnS марганец входит в виде ионов $Mn^{_{2+}}$, заменяющих ионы $Zn^{_{2+}}$ в узлах решетки. Кубическая решетка ZnS- β (сфалерит) относится к группе пространственной симметрии T², ZnS-α (вюрцит) к C₆. Локальная симметрия кристаллического поля, в месте нахождения парамагнитного иона Mn^{2+} в $ZnS-\beta$, относится к группе правильного тетраэдра, а в ZnS-*α* - к группе тетраэдра, искаженного вдоль тригональной оси. В кристаллическом поле симметрии Т_d происходит расщепление первого электронно-возбужденного состояния иона Mn^{2+} : ${}^{4}G \rightarrow {}^{4}T_{1} + {}^{4}T_{2} + ({}^{4}E, {}^{4}A_{1})$. В центрально-несимметричном поле кристалла состояния разной четности перемешиваются, четность перестает служить характеристикой отдельных уровней, и диагональные матричные элементы возмущения становятся для отдельных переходов отличными от нуля [40]. Этим, вероятно, объясняется возможность наблюдать интенсивную фотолюминесценцию ZnS-Mn в марганцевой полосе, в отличие от ФЛ СаО-Мп.

На поверхности и в приповерхностной области симметрия окружения центра свечения Mn²⁺ понижается до С_{зу}. В этом случае произойдет дополнительное расщепление уровней ${}^{4}T_{1} \rightarrow {}^{4}E + {}^{4}A_{2}$, ${}^{4}T_{2} \rightarrow {}^{4}E + {}^{4}A_{1}$. Излучательные переходы ${}^{4}E \rightarrow {}^{6}A_{1}$, ${}^{4}A_{1} \rightarrow {}^{6}A_{1}$ дадут поляризованные линии в люминесценции – перпендикулярно и параллельно оси С₃. Обрыв связей при образовании поверхности, наряду с понижением симметрии окружения центров свечения, находящихся на поверхности, изменит, в результате деформации решетки, величину кристаллического поля в приповерхностной области. В случае сжатия кристаллической решетки в направлении, перпендикулярном поверхности, произойдет усиление кристаллического поля лигандов. Усиление кристаллического поля приведет к длинноволновому смещению спектра излучения $Mn^{2+}[41, 42].$

В приповерхностной области кристалла понижение симметрии можно рассматривать как возмущение, не приводящее к значительному расщеплению уровней ${}^{4}T_{1}$ и ${}^{4}T_{2}$.

Более сильное расщепление этих уровней соответствует понижению симметрии окружения от T_d до $C_{\rm 3V}$ для ионов ${\rm Mn}^{2+}$, расположенных в плоскости поверхности.

Марганец оказался очень эффективным активатором при химическом возбуждении. Сечение возбуждения при рекомбинации атомов H достигает 10^{-20} см². Благодаря этому предельно малые кон-

центрации марганца (10^{-6} %) обнаруживают себя в спектрах свечения ГХЛ.

На рис.1 приведены спектры ФЛ и ГХЛ образца ZnS-Mn. Спектр ФЛ представлен оранжевой полосой с λ_{max} =585 нм (⁶A₁→⁴T₁) (кривая 1, рис. 1, *б*). Небольшой пик проявился при 665,5нм.

В спектре ГХЛ_H (индекс Н означает водород) наряду с полосой 585 нм основной становится широкая полоса λ_{max} =665 нм (*T*=295 К) (кривая 3, рис. 1, б). В фосфорах, не содержащих марганец, полоса 665 нм отсутствует. Восстановление поверхности сухим водородом приводит к накоплению вакансий серы в приповерхностной области кристалла. Вакансии серы, понижая симметрию окружения иона Mn²⁺ с T_d до C_{3V}, увеличивают вероятность излучательного перехода ⁴Е→⁶A₁ в ионах активатора, расположенных у поверхности, и увеличивают интенсивность красной полосы.

Появлению красной полосы ГХЛ ZnS?Mn в водороде также благоприятствуют высокие концентрации марганца (>0,5 вес. %). За красную полосу ГХЛ_H ответственны либо центры, в которых ион Mn²⁺ ассоциирован с вакансией серы, либо комплексные центры, состоящие из двух и более ионов Mn²⁺. Образованию комплексных центров Mn²⁺– V_s^{**} в силу принципа компенсации способствуют вакансии серы V_s^{**} (кривые 4, 5, рис. 1, δ).

При сколе монокристаллов ZnS-Mn (плоскость (011) и (1 $\overline{2}0$)) в вакууме или молекулярном водороде наблюдается лишь слабая вспышка свечения, затухающая за 0,5-5 с. Однако при сколе монокристаллов ZnS-Mn в атомарном водороде в момент скола происходит интенсивная вспышка свечения, достигающая величин 10¹² квантов/см²с (ZnS-Mn). Люминесцентное свечение сравнительно медленно затухает и на образце ZnS-Mn переходит в стационарное за время $\geq 10^2$ с [25]. Спектр свечения ZnS-Mn в атомарном водороде (рис. 1, *в*) включает основную полосу (содержится и в спектре ФЛ) λ_{max} =588 нм дополнительные полосы (λ_{1max} =665 нм и λ_{2max} =705 нм), отсутствующие при ФЛ. С ростом температуры у данных полос наблюдается коротковолновое смещение, характерное для иона Mn²⁺ с незаполненной 3d⁵ оболочкой. Основная полоса ГХЛ λ_{max} =588 нм, как и при ФЛ, испускается ионами Mn²⁺, расположенными непосредственно у поверхности сульфида цинка. Полоса 705 нм испускается Mn²⁺-центрами, расположенными непосредственно на поверхности и ассоциированными с вакансией серы. Полоса 665 нм относится к Mn²⁺-центрам на поверхности, на которых адсорбированы молекулы H₂.

Люминесцентные методы изучения взаимодействия атомов и молекул с поверхностью твердых тел

Кинетические и стационарные характеристики ГХЛ связаны как с состоянием поверхности твердого тела, так и с механизмами взаимодействия атомов и молекул с поверхностью, приводящими к возбуждению ГХЛ. Построение механизма ГХЛ основано на проведении комплекса экспериментальных исследований, когда параллельно измеряются люминесцентные, адсорбционные и электрофизические характеристики образца. Полученные результаты составляют основу для построения модели механизма возбуждения ГХЛ. Если модельные зависимости интенсивности люминесценции от времени, плотности потоков атомов и молекул, температуры образца качественно соответствуют эксперименту, то в этом случае можно так подобрать параметры модели, чтобы достичь и количественного совпадения. Решение обратной задачи позволяет найти сечения, энергии активации, частотные факторы, теплоты адсорбции атомов и молекул.



Рис. 1. Спектры люминесценции ZnS-Mn²⁺ (2,5 вес. %), 295 К: а) возбуждение микрокристаллического образца ртутной лампой (ДРТ 125-1) с фильтром (УФС-06) линиями 317, 339, 369 нм; б) возбуждение микрокристаллического образца атомарным водородом, кривые 1-6 результат разложения экспериментальной кривой 7 методом Аленцева-Фока. Плотность потока атомов Н в эффузионном пучке 10¹⁷ см²с⁻¹; давление H+H₂ в области высокочастотной разряда 1,3·10⁻³ торр; в) после скола монокристалла ZnS-Mn2+ в атомарном водороде, кривые 2-4 результат разложения экспериментальной кривой 1 методом Аленцева-Фока. Плотность потока атомов Н в эффузионном пучке 10¹⁶ см⁻²с⁻¹; давление H+H₂ в области высоко частотной разряда 1,3·10⁻³ торр; в) после скола монокристалла ZnS-Mn2+ в атомарном водороде, кривые 2-4 результат разложения экспериментальной кривой 1 методом Аленцева-Фока. Плотность потока атомов Н в эффузионном пучке 10¹⁶ см⁻²с⁻¹; давление H+H₂ в области высоко частотной разряда 1,3·10⁻³ торр

Fig. 1. Luminescence spectra of ZnS-Mn²⁺ (2,5 wt.%), 295 K: a) microcrystalline sample excitation by (DRT 125-1) mercury lamp with (UFS-06) filter of 317, 339, 369 nm lines; b) microcrystalline sample excitation by atomic hydrogen, curves 1-6 are the results of experimental curve 7 decomposition by the Alentsev-Fock method. H atoms flux density in the effusion beam is 10¹⁷ cm²s⁻¹; H+H₂ pressure in the area of the high frequency discharge is 1,3·10⁻³ torr; c) after cleavage of the ZnS-Mn²⁺ single crystal in atomic hydrogen, curves 2-4 are the result of the experimental curve 1 decomposition by the Alentsev-Fock method. H atoms flux density in the effusion beam is 10¹⁶ cm⁻²s⁻¹; H+H₂ pressure in the high frequency discharge is 1,3·10⁻³ torr

Наиболее доступными экспериментальными характеристиками РРЛ являются кинетические кривые разгорания ГХЛ и зависимости стационарной интенсивности от температуры образца и плотности потока атомов.

Механизм возбуждения ГХЛ включает следующий минимальный набор последовательно протекающих процессов [43]:

$$H + L \xrightarrow{v_1} HL$$
$$H + HL \xrightarrow{v_2} H_2L$$
$$H_2 + L \xrightarrow{v_{-3}} H_2L$$

Над стрелками указаны отнесенные к единице времени вероятности соответствующих реакций.

$$v_{i} = j\sigma_{i0} \exp\left(-\frac{E_{i}}{kT}\right) = j\sigma_{i}, i = 1,$$

$$v_{-3} = v_{-30} \exp\left(-\frac{q_{3} + E_{3}}{kT}\right).$$
(1)

Введены обозначения поверхностных концентраций в момент времени t: L $\rightarrow N(t)$, RL $\rightarrow N_1(t)$, R₂L $\rightarrow N_2(t)$.

Система кинетических уравнений для определения N(t), $N_1(t)$, $N_2(t)$ имеет вид [43]

$$\dot{N}(t) = -v_1 N + v_{-3} N_2 \dot{N}_1(t) = v_1 N - v_2 N_1 \dot{N}_2(t) = v_2 N_1 - v_{-3} N_2$$
(2)

Интенсивность люминесценции для произвольных начальных заполнений поверхности атомами и молекулами $N_1(0)=N_{10}, N_2(0)=N_{20}, N(0)=N_0-N_{10}-N_{20}$, равна:

$$I(t) = \eta v_2 N_1(t),$$

$$N_1(t) = \frac{v_1 N_0}{r_1 - r_2} [A_1 e^{r_1 t} - A_2 e^{r_2 t} + C],$$

$$A_{1,2} = 1 + \frac{v_{-3}}{r_{1,2}} + \frac{(r_{1,2} + v_{-3}) N_{10}}{v_1 N_0} - \frac{N_{20}}{N_0},$$

$$C = v_{-3} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right), r_{1,2} = -\lambda (1 \pm \sqrt{1 - \mu/\lambda^2}),$$
(3)

При «малых» t ($|r_{1,2}t| <<1$) интенсивность ГХЛ равна (1–3):

$$I(t) = \eta v_2 N_{10} + \eta [v_1 (N_0 - N_{10} - N_{20}) - v_2 N_{10}] v_2 t.$$
(4)

Начальная вспышка свечения ГХЛ интенсивностью

$$I_0 = \eta v_2 N_{10}$$

связана с рекомбинацией свободных атомов с адсорбированными на поверхности в момент времени *t*=0 (*N*₁₀≠0) (4). После вспышки наблюдается линейный рост интенсивности ГХЛ со временем (рис. 2).

$$\frac{dI(t)}{dt} = \eta \left[\sigma_1 (N_0 - N_{10} - N_{20}) - \sigma_2 N_{10} \right] \sigma_2 j^2.$$
 (5)

Кинетические кривые (3)–(5) разгорания ГХЛ

$$I(t) = \eta v_2 N_1(t).$$
 (6)



Рис. 2. Зависимость интенсивности гетерогенной хемилюминесцентной фосфора ZnS-Mn²⁺ от времени (при малых <10⁻¹²см⁻³концентрациях атомов водорода), T=295 К

Fig. 2. Dependence of heterogeneous chemiluminescent intensity of phosphorus $ZnS-Mn^{2+}$ on time (at small $<10^{-12}$ cm⁻³ concentrations of hydrogen atoms), T=295 K

в простейшем случае представляют немонотонную кривую с одним максимумом (рис. 3, кривая 1). Но экспериментальные кривые значительно разнообразнее. Эти особенности связаны с процессами энергообмена в адсорбционном слое по мере накопления на поверхности адсорбата [44] и с процессами послойного травления поверхности ZnS атомарным водородом [45] (рис. 3, кривая 2).





Fig. 3. Luminescence of ZnS-Mn²⁺ in atomic hydrogen. T=295 K. The ZnS-Mn²⁺ surface was previously cleaned by heating the sample in a vacuum of 3,0·10⁻⁶ torr: 1 – approximation by dependence (8); 2 – experiment; 3 – approximation taking into account energy exchange in the adsorption layer [43]

Кинетическая кривая разгорания ГХЛ (рис. 3, кривая 1) описывается зависимостью:

 Таблица 1.
 Параметры v₁, v₂ и v₋₃ кинетической кривой 1, рис. 4

 Table 1.
 Parameters v₁, v₂ and v₋₃ of kinetic curve 1, Fig. 4

Относительные вероятности/Relative probabilities	$v_1: H + L \xrightarrow{v_1} HL$	$v_2: H + HL \xrightarrow{v_2} H_2L$	$v_{-3}: H_2 + L \xrightarrow{v_{-3}} H_2L$
Значения, c ⁻¹ /Values, s ⁻¹	6,67·10 ⁻⁵	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$3,26 \cdot 10^{-4}$

$$I(t)=127,02\exp(-0,00561t)-$$

-127,87exp (-0,00564t)+589,48;
(I - отн. ед., t - s). (7)

Поскольку разница между показателями степени r_1 и r_2 в (6), (7) меньше достижимой погрешности, следует перейти в (3) к пределу $\Delta r \rightarrow 0$:

$$I(t) = \lim_{r_{1} \to r_{2}} \eta v_{2} \frac{v_{1}N_{0}}{r_{1} - r_{2}} [A_{1}e^{r_{1}t} - A_{2}e^{r_{2}t} + C] =$$

$$I_{0} + (I_{\infty} - I_{0})(1 - e^{r_{1}}) +$$

$$+I_{\infty}rte^{rt} \left[\left(1 + \frac{r}{v_{-3}} \right) + \frac{I_{0}}{I_{\infty}} \left(1 + \frac{v_{-3}}{r} - \frac{N_{20}}{N_{10}} \right) \right];$$

$$r_{1,2} = -\lambda, \ 2\lambda = v_{1} + v_{2} + v_{-3},$$

$$\mu = (v_{1} + v_{2})v_{-3} + v_{1}v_{2}, \ \mu = \lambda.$$
(8)

Параметры v_1 , v_2 и v_{-3} для уравнения (8) представлены в табл. 1.

На рис. 4 приведена долговременная кинетика ГХЛ ZnS-Mn²⁺. Изменение интенсивности свечения, вероятно, связано с последовательным послойным травлением поверхности ZnS атомарным водородом [45]. Начальная вспышка свечения отражает предварительное заполнение поверхности атомами водорода.

Нестационарные люминесцентные методы изучения взаимодействий атомов водорода на поверхности ZnS-Mn²⁺

Люминесцентное свечение, возбуждаемое при взаимодействии свободных атомов и радикалов с поверхностью, позволяет изучать insitu, без внесения возмущений в систему, важные детали физико-химических процессов на поверхности в неравновесных и нестационарных условиях.

Примером исследований такого рода служит люминесцентный метод разделения ударного и диффузионного механизмов рекомбинации атомов водорода на поверхности ZnS-Mn²⁺ [43, 46]:

$$R + RL \xrightarrow{V_2} R_2^v L, \quad 2RL \xrightarrow{k} R_2^v L + L,$$

$$R_2^v L + Mn_s^{2+} \rightarrow R_2 L + (Mn^{2+})_s^*,$$

$$(Mn^{2+})_s^* \rightarrow Mn_s^{2+} + hv.$$

Здесь звездочкой обозначено возбужденное состояние центра свечения ${\rm Mn}^{2+}{
m S}$ на поверхности; hv – испускаемый квант света; v_2 –вероятность ударной рекомбинации в единицу времени; k – константа скорости реакции диффузионной рекомбинации атомов на поверхности.

Интенсивность люминесценции I пропорциональна скорости рекомбинации атомов и квантовым выходам ГХЛ η , η_1 в реакциях ударной

 $R + RL \xrightarrow{i_2} R_2 L$ Ридила-Или (РИ) и диффузионной $2RL \xrightarrow{k} R_2 L$ Лэнгмюра-Хиншелвуда (ЛХ) рекомбинации атомов.

$$I = \eta v_2 N_1 + \eta_1 k N_1^2.$$
 (9)



Рис. 4. Зависимость интенсивности свечения фосфора ZnS-Mn²⁺ от времени при высоких концентрациях атомов водорода ≥10¹³ см³, T=295 K

Fig. 4. Dependence of the luminescence intensity of phosphorus $ZnS-Mn^{2*}$ on time at high concentrations of hydrogen atoms $\geq 10^{13} \, \mathrm{cm}^{-3}$, T=295 K

Наличие реакции ЛХ проявляется в начальном резком тушении ГХЛ после «выключения» атомов на величину $I_{\rm PH} = \eta v_2 N_1$, $v_2 = \sigma_2 (j=0) = 0$ (9) и последующем постепенном квадратичном со временем спаде интенсивности свечения ГХЛ

$$I_{\rm JIX} = \eta_1 k N_1^2 = \eta_1 k N_1^2(0) / (1 + k N_1(0)t)^2.$$
(10)

После «выключения» j=0 атомов Н интенсивность ГХЛ падает примерно на два порядка (рис. 5) ($I_{\rm PH}/I_{\rm JX}\approx100$).

Величины $kN_1(0)$ в (10) для различных времен заполнения поверхности атомами водорода приведены в табл. 2 (T=306 К).

 Таблица 2.
 Скорость затухания гетерогенной хемилюминесценции

 Table 2.
 Speed of heterogeneous chemiluminescent damping

Время заполнения поверхности атомами (мин) Time of surface filling with atoms (min)	35	80	120	150	200	250	300
Скорость затухания гетероген- ной хемилюминесценции Heterogeneous chemilumines- cence decay rate, $kN_1(0)$, c ⁻¹	0,2	0,29	0,31	0,3	0,35	0,36	0,37



Рис. 5. Затухание свечения фосфора ZnS-Mn²⁺ после «выключения» (j=0) атомов водорода. Выключение атомов через 250 мин после начала возбуждения гетерогенной хемилюминесценции, T=306 К

Fig. 5. Damping of phosphorus emission of ZnS-Mn²⁺ after the «shutdown» (j=0) of hydrogen atoms. Shutting of atoms in 250 minutes after start of heterogeneous chemiluminescent excitation, T=306 K

Предельное заполнение $kN_1(0) \le 10^{15}$ см⁻², что соответствует $k=(306K)\approx 4\cdot 10^{-16}$ см²с⁻¹.

Концентрационно-временные циклы

Интенсивность ГХЛ *I* пропорциональна скорости ударной рекомбинации атомов

$$V(j) = B_1 \sigma_2 j N_1(j).$$
 (11)

При ступенчатом изменении *j* на Δj концентрации адсорбированных частиц не могут измениться мгновенно, поэтому начальный скачок интенсивности ΔI пропорционален Δj . Имеем согласно (11)

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta j}{j}.$$
 (12)

По приращению интенсивности в (12) представляется возможность вычислить новый поток атомов

$$j_{(1)} = j + \Delta j = j \left(1 + \frac{\Delta I}{I} \right).$$
(13)

После выхода релаксационной кривой на стационар I_1 , при потоке атомов $j_{(1)}$ вновь изменим $j_{(1)}$ и по новому приращению интенсивности $\Delta I_{(1)}$ (13) определим

$$j_{(2)} = j_{(1)} \left(1 + \frac{\Delta I_{(1)}}{I_1} \right)$$
(14)

и т. д., согласно (13), (14). Люминесцентный метод отличает безынерционность. Запаздывание определяется временем τ высвечивания возбужденных центров свечения. Даже для запрещенных переходов $\tau \le 10^{-3}$ с. Это позволяет регистрировать очень быстрые изменения плотностей потоков атомов и весьма просто определять абсолютные значения *j* и Δj , если известно абсолютное значение *j* хотя бы в одной точке. На рис. 6 приведены релаксационные кинетические кривые ГХЛ_Н, полученные при выключении и включении атомов с изменением плотности потока атомов j на Δj .



Рис. 6. Кинетические кривые люминесценции ZnS-Mn²⁺ в атомарном водороде при выключении и включении атомов водорода различной концентрации – темновые паузы. Температура образца 306 К, давление в разрядной трубке 3,0·10⁻² торр, экспозиция фотоэлектронного умножителя 20 мс, диапазон 30 с.

Fig. 6. Kinetic curves of ZnS-Mn²⁺ luminescence in atomic hydrogen upon turning off and turning on of hydrogen atoms with various concentrations - «dark» pauses. Sample temperature is 306 K, pressure in the discharge tube is 3,0·10⁻² torr, photomultiplier tube exposure is 20 ms, diapason is 30 s

На рис. 7 приведена полученная методом скачков концентраций зависимость интенсивности ГХЛ от плотности потока атомов для малых *j*. Как видно из рис. 7, интенсивность свечения $\text{ZnS}-\text{Mn}^{2+}$ в атомарном водороде сверхлинейно зависит от концентрации атомов водорода (плотности потока атомов H) при низких концентрациях атомов, что соответствует ударному (Ридила–Или)

$$R + L \xrightarrow{V_1} RL, R + RL \xrightarrow{V_2} R_2^vL$$

механизму возбуждения ГХЛ:

$$I(j) = \eta N_0 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{v_{-10}} \exp(\frac{q_1 + E_1}{kT}) j^2.$$
 (15)

Определим I(j) зависимость стационарной интенсивности ГХЛ от плотности потока атомов с учетом процессов десорбции атомов (I), адсорбции молекул (II), атомно-молекулярного обмена (IV) и диссоциации молекул (V):

$$I. \quad \mathbf{R} + \mathbf{L} \xrightarrow{\mathbf{v}_{1}} \mathbf{RL};$$

$$II. \quad \mathbf{R} + \mathbf{RL} \xrightarrow{\eta v_{2}} \mathbf{R}_{2}\mathbf{L} + hv$$

$$III. \quad \mathbf{R}_{2} + \mathbf{L} \xrightarrow{v_{3}} \mathbf{R}_{2}\mathbf{L};$$

$$IV. \quad \mathbf{R} + \mathbf{R}_{2}\mathbf{L} \xrightarrow{v_{4}} \mathbf{R}_{2} + \mathbf{RL};$$

$$V. \quad \mathbf{R}_{2}\mathbf{L} + \mathbf{L} \xrightarrow{v_{5}} \mathbf{RL} + \mathbf{RL}.$$

ı



Рис. 7. Зависимость интенсивности гетерогенной хемилюминесценции ZnS-Mn²⁺ в атомарном водороде от концентрации атомов водорода (плотность потока атомов ~10¹⁵ см² с⁻¹), T=295 K

Fig. 7. Dependence of intensity of $ZnS-Mn^{2+}$ heterogeneous chemiluminescence in atomic hydrogen onhydrogen atoms concentration (atom flux density ~10¹⁵ cm⁻²s⁻¹), T=295 K

$$I(j) = \frac{BN_{0}v_{2}[v_{1}v_{-3} + (v_{1} + v_{3})(v_{4} + v_{5})]}{\left[(v_{1} + v_{-1} + v_{2})(v_{3} + v_{-3} + v_{4} + v_{5}) + \right]} = \left[\frac{BN_{0}j^{2}\sigma_{2}[\sigma_{1}v_{-3} + \sigma_{1}v_{5} + v_{3}\sigma_{4} + \sigma_{4}\sigma_{1}j)] + \right]}{\left[\frac{BN_{0}j\sigma_{2}v_{3}v_{5}}{\left[j^{2}(\sigma_{1}\sigma_{2} + \sigma_{1}\sigma_{4}) + j\left[\frac{\sigma_{1}(v_{3} + v_{-3} + v_{5}) + + \sigma_{2}(v_{3} + v_{-3}) + \sigma_{4}v_{-1}\right] + \right]},$$
(16)

Зависимость стационарной интенсивности ГХЛ плотности потока атомов определяется (1), (2), (15), (16) при $t=\infty$ ($r_{1,2}<0$).

$$I = \frac{BN_{0}\sigma_{1}\sigma_{2}v_{-3}j^{2}}{\sigma_{1}\sigma_{2}j^{2} + (\sigma_{1} + \sigma_{2})v_{-3}j + v_{-1}v_{-3}} \approx \frac{BN_{0}\sigma_{1}\sigma_{2}v_{-3}j}{\sigma_{1}\sigma_{2}j + (\sigma_{1} + \sigma_{2})v_{-3}}.$$
 (17)

Интенсивность ГХЛ монотонно нарастает с увеличением j в области высоких j и низких температур, когда в (16), (17) процессы адсорбции преобладают над десорбционными

$$I(j) = \frac{BN_0\sigma_2[\sigma_1v_{-3} + \sigma_1v_5 + v_3\sigma_4 + \sigma_4\sigma_1j]}{(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_4)}.$$
 (18)

Интенсивность ГХЛ достигает насыщения в зависимости от j (17) или может продолжить линейный рост (18) за счет вклада реакции обмена (IV).

Насыщение I(j) при больших потоках атомов связано с задержкой на поверхности молекул, образующихся при ударной рекомбинации атомов – явление рекомбинационной блокировки поверхности (рис. 8).

Полученное выражение *I*(*j*) (17) качественно верно описывает эксперимент (рис. 8)

$$I(j) = \frac{j^2}{0,42\,j^2 + 2,9\,j + 55}$$

и позволяет получить оценки величин относительных скоростей реакций

$$v_1 \approx 10^{-4} \text{ c}^{-1}; v_2 \approx 10^{-5} \text{ c}^{-1};$$

 $v_{-1}(v_3 + v_{-3} + v_5) \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}; v_5 \approx 0, 1(v_1 + v_2).$



- Рис. 8. Зависимость стационарной интенсивности гетерогенной хемилюминесценции люминофора ZnS-Mn²⁺ от концентрации атомов водорода. Температура образца 306 К
- Fig. 8. Dependence of stationary intensity of ZnS-Mn²⁺ phosphor heterogeneous chemiluminescence on hydrogen atoms concentration. The sample temperature is 306 K

Полученное выражение I(j) (17) качественно верно описывает эксперимент (рис. 8)

$$I(j) = \frac{j^2}{0,42\,j^2 + 2,9\,j + 55}$$

и позволяет получить оценки величин относительных скоростей реакций

$$v_1 \approx 10^{-4} \text{ c}^{-1}; v_2 \approx 10^{-5} \text{ c}^{-1};$$

 $v_{-1}(v_3 + v_{-3} + v_5) \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}; v_5 \approx 0.1(v_1 + v_2).$

Релаксационные кривые интенсивности ГХЛ содержат ту же информацию, что и кинетические кривые разгорания ГХЛ на поверхности, предварительно не заполненной адсорбатом, поскольку кинетический механизм возбуждения и число форм адсорбции остаются неизменными при различных *j*. В дополнение к этому релаксационные кривые содержат новые сведения о вероятности излучательных переходов на поверхности, металлизации поверхности, миграции водорода в объем фосфора и его влиянии на квантовый выход объемных центров свечения и интенсивность фотолюминесценции [46–48].

Люминесцентный метод отличает безынерционность (запаздывание на величину скорости высвечивания возбужденных центров свечения для запрещенных переходов $\tau < 10^{-3}$ с), позволяющая регистрировать очень быстрые изменения плотностей потоков атомов, и простота определения абсолютных значений *j* и Δj .

Заключение

Методы, основанные на явлении гетерогенной хемилюминесценции, дают чувствительный инструмент для изучения химического состава поверхности, эффективности электронных излучательных процессов на поверхности, механизмов переноса энергии и процессов модификации поверхности. Указанные возможности актуальны при реализации плазмохимических методов нанесения защитных, восстановительных, теплозащитных, коррозионностойких, износостойких покрытий для защиты нефтедобывающего оборудования.

Нестационарные люминесцентные методы изучения рекомбинации атомов водорода на поверхности ZnS-Mn²⁺ позволили разделить ударный и

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ивановский В.Н. Коррозия скважинного оборудования и способы защиты от нее // Коррозия. Территория нефтегаз. – 2011. – № 1 (18). – С. 18–25.
- Применение технологий газотермического напыления для решения задач повышения ресурса оборудования и сооружений. Общество с ограниченной ответственностью «Урал – Технологические системы покрытий» // Docslid. 2019. URL: https://ural-tsp.ru/wp-content/uploads/2019/01/prezent.pdf (дата обращения 25.11.2019).
- Гранкин Д.В. Хемилюминесценция облученного УФ-светом кристалла Zn₂SiO₄−Mn под действием атомов водорода // Журнал физической химии. – 2017. – Т. 92. – № 4. – С. 671–673.
- Nanomaterial-amplified chemiluminescence systems and their applications in bioassays / Q. Li, L. Zhang, J. Li, C. Lu // TrAC Trends in Analytical Chemistry. - 2011. - V. 30. (2). -P. 401-413.
- Classical oxidant induced chemiluminescence of fluorescent carbon dots / Z. Lin, W. Xue, H. Chen, J.-M. Lin // Chemical Communications. - 2012. - V. 48. - P. 1051-1053.
- Quantum dots-enhanced chemiluminescence: mechanism and application / H. Chen, L. Lin, H. Li, J.-M. Lin // Coordination Chemistry Reviews. - 2014. - V. 263-264. - P. 86-100.
- Flow-injection analysis of hydrogen peroxide based on carbon nanospheres catalyzed hydrogen carbonate-hydrogen peroxide chemiluminescent reaction / H. Chen, L. Lin, Z. Lin, C. Lu, G. Guo, J.-M. Lin // Analyst. - 2011. - V. 136. - P. 1957-1964.
- Plasmonic luminescent core-shell nanocomposites-enhanced chemiluminescence arising from the decomposition of peroxomonosulfite / H. Chen, W. Xue, C. Lu, H. Li, Y. Zheng, J.-M. Lin // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. - 2013. - V. 116. - P. 355-360.
- Nanoparticle-assisted chemiluminescence and its applications in analytical chemistry / D.L. Giokas, A.G. Vlessidis, G.Z. Tsogas, N.P. Evmiridis // TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2010. – V. 29(10). – P. 1113–1126.
- Dingkun Zhang, Jin-Ming Lin. Recent development of gas-solid phase chemiluminescence // Journal of Analysis and Testing. – 2017. – V. 1 (4). – P. 267–273.
- One-step enrichment and chemiluminescence detection of sodium dodecyl benzene sulfonate in river water using Mg-Al-carbonate layered double hydroxides / W. Guan, W. Zhou, D. Han, M. Zhang, C. Lu, J.-M. Lin // Talanta. - 2014. - V. 120. -P. 268-273.
- 12. On-line solid phase extraction of humic acid from environmental water and monitoring with flow-through chemiluminescence /

диффузионный процессы рекомбинации атомов водорода и найти доли вкладов ударного и диффузионного механизмов в полную скорость рекомбинации атомов в зависимости от температуры образцов и плотности потока свободных атомов.

Полученные результаты важны для идентификации процессов возбуждения гетерогенной хемилюминесценции, определения элементарных стадий и параметров атомно-молекулярных процессов на поверхности, определения концентрации атомов и состава плазменного потока по интенсивности гетерогенной хемилюминесценции, люминесцентно-активных примесей на поверхности твердых тел, а также для экспресс-управления процессами в плазмохимических системах газтвердое тело.

J. Qu, H. Chen, C. Lu, Z. Wang, J.-M. Lin // Analyst. - 2012. - V. 137. - P. 1824-1830.

- Shah S.N., Lin J.M. Recent advances in chemiluminescence based on carbonaceous dots // Advances in Colloid and Interface Science. – 2017. – V. 241. – P. 24–36. DOI: 10.1016/j.cis.2017.01.003.
- Sensitivity and binding kinetics of an ultra-sensitive chemiluminescent enzyme-linked immunosorbent assay at arrays of antibodies / C.I. Tobos, S. Kim, D.M. Rissin, J.M. Johnson, S. Douglas, S. Yan, S. Nie, B. Rice, K.J. Sung, H.D. Sikes, D.C. Duffy // Journal of Immunological Methods. - 2019. - V. 474. 112643 -P. 1-13. DOI: 10.1016/j.jim.2019.112643.
- Flow-based luminescencesensing methods for environmental water analysis / X. Wang, J.M. Lin, M.L. Liu, X.L. Cheng // TrAC Trends in Analytical Chemistry. - 2009. - V. 28 (1). - P. 75-87.
- Lin Z., Chen H., Lin J.-M. Peroxide induced ultra-weak chemiluminescence and its application in analytical chemistry // Analyst. - 2013. - V. 138 (18). - P. 5182-5193.
- Preparation of surface imprinting polymer capped Mn-doped ZnS quantum dots and their application for chemiluminescence detection of 4-nitrophenol in tap water / J. Liu, H. Chen, Z. Lin, J.-M. Lin // American Chemical Society. - 2010. - V. 82. -P. 7380-7386.
- Plasmon-assisted enhancement of the ultraweak chemiluminescence using Cu/Ni metal nanoparticles / H. Chen, R. Li, H. Li, J.-M. Lin // The Journal of Physical Chemistry C. - 2012. -V. 116. - P. 14796-14803.
- Mestre Y.F., Zamora L.L., Calatayud J.M. Flow-chemiluminescence: a growing modality of pharmaceutical analysis // Luminescence. - 2001. - V. 16. - P. 213-235.
- Dodeigne C., Thunus L., Lejeune R. Chemiluminescence as diagnostic tool. A review // Talanta. - 2000. - V. 51. - P. 415-439.
- On the heterogeneous chemiluminescence of Y₂O₂S crystal phosphors activated by europium / V.V. Styrov, N.D. Tolmacheva, Y.I. Tyurin, S.K. Shigalugov, V.D. Khoruzhii, Y.A. Sivov, E.Yu. Plotnicova, V.S. Sypchenko // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. V. 8. P. 1158-1160.
- Heterogeneous chemiluminescence of crystallophosphor catalysts in the CO+O mixture / S.K. Shigalugov, Y.I. Tyurin, V.V. Styrov, N.D. Tolmacheva // Kinet Catal. - 2000. - V. 41. - P. 531-537.
- Гранкин Д.В., Бажин А.И., Гранкин В.П. Генерация высокоэнергетических электронов в металле под действием тепловых атомов водорода и дейтерия из плазмы // Известия российской академии наук. Серия физическая. – 2017. – Т. 82. – № 2. – С. 182–185.
- 24. Окисление водорода на палладии: метод хемотоков в нанодиоде шоттки / В.П. Гранкин, Д.В. Гранкин, В.В. Стыров,

С.В. Симченко, О.А. Гуральник // Журнал физической химии. - 2017. - Т. 91. - № 2. - С. 297-303.

- Electron accommodation during hydrogen atom adsorption on a juvenile surface of a zinc sulfide single crystal / A.F. Gorbachev, V.V. Styrov, V.M. Tolmachev, Yu.I. Tyurin // Soviet Physics-JETP. - 1986. - V. 64 (1). - P. 99-109.
- Авторское свидетельство № 1603257 (СССР). Способ измерения адсорбционно-активных газов / А.Ф. Горбачев, В.В. Стыров, В.М. Толмачев, Ю.И. Тюрин // Открытия. Изобретения. 1990. № 40. С. 23–28.
- 27. Shigalugov S.H., Dubrov D.V. Chemiluminescence Y_2O_3 : Bi³⁺ induced by nitrogen oxide // RASAYAN Journal of Chemistry. 2019. V. 12 (4). P. 2097–2102.
- Стыров В.В., Тюрин Ю.И., Шигалугов С.Х. Методы люминесцентного анализа, основанные на явлении гетерогенной хемилюминесценции // Заводская лаборатория. – 1991. – Т. 57. – № 11. – С. 1–5.
- Хемилюминесцентный анализатор озона в атмосферном воздуxe (3.02 П-А). URL: http://www.optec.ru/produktsiya.html? c_dept_id=16&c_good_id=15 (дата обращения 25.11.2019).
- 30. Microstructures and luminescence behaviors of Mn²⁺ doped ZnS nanoparticle clusters with different core shell assembled orders / Chunyan Song, Bing Chen, Yunchao Chen, Xianping Fan // Journal of Alloys and Compounds. 2013. V. 590. P. 546–552. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.12.169
- Murugadoss G., Rajamannan B., Madhusudhanana U. Synthesis and characterization of water-soluble ZnS: Mn²⁺ nanocrystals // Chalcogenide Letters. - May 2009 - V. 6 (5). - P. 197-201.
- Rema Devi B.S., Raveendran R., Vaidyan A.V. Synthesis and characterization of Mn2+-doped ZnS nanoparticles // Synthesis and characterization of nanoparticles. Pramana. – April 2007. – V. 68 (4). – P. 87–89. DOI: https://doi.org/10.1007/s12043-007-0068-7
- 33. Origin of the green photoluminescence from zinc sulfide nanobelts / Changhui Ye, Xiaosheng Fang, Guanghai Li, Lide Zhang // Applied Physics Letters. - 2004. - V. 85. - P. 3035-3037. URL: https://doi.org/10.1063/1.1807018.
- Vishwakarma H.L., Archana Sharan, Anju Singh. Studies on the synthesis and characterization of nano phosphors for field emission devices // International Journal of Science and Research (IJSR). – June 2014. –V. 3 (6). – P. 219–222. Paper ID: 02013895.
- Doped ZnS: Mn nanoparticles obtained by sonochemical synthesis / O.A. Korotchenkov, A. Cantarero, A.P. Shpak, Yu.A. Kunitskii, A.I. Senkevich, M.O. Borovoy, A.B. Nadtochii // Nanotechnology. - 2005. - V. 16(10). - P. 2033-2038. URL: https://doi.org/ 10.1088/0957-4484/16/10/008.
- 36. Synthesis and characterization of photoluminescent PVA/ZnS: Mn²⁺ nanocomposites. / L.Priya // Mapana Journal of Sciences. – 2013. – V. 12. – P. 31–37. URL: https://doi.org/10.12723/ mjs.24.4 (дата обращения 25.11.2019).

- Ru-Shi Liu. Phosphors, up conversion nano particles, quantum dots and their applications. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.– 593 c. DOI 10.1007/978–3-662–52771–9
- 38. Шигалугов С.Х. Установка для исследования твердых тел с неравновесными кислородо содержащими газовыми средами люминесцентными методами // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 3. С. 57–64.
- 39. Tollefson E.L., Le Roy D.J. The reaction of atomic hydrogen with acetylene // The Journal of Chemical Physics. – 1948. – V. 16. – № 11. – P. 1055–1062. URL: https://doi.org/10.1063/1.1746724 (дата обращения 25.11.2019).
- Захарченя В.П., Копылянский А.А. Спектроскопия кристаллов. – Москва: Наука, 1966. – 99 с.
- Берсукер И.Б. Электронное строение и свойства координационных соединений. – Л.: Химия, 1976. – 352 с.
- 42. Tanabe Y., Sugano S. On the absorption spectra of complex ions // Journal of the Physical Society of Japan. – 1954. – V. 9. – № 5. – P. 753–766.
- Generation of excited electronic states at the nonmetal surface by the hydrogen atoms beam / Y.I. Tyurin, N.N. Nikitenkov, I.T. Sigfusson, A. Hashhash, Y. Van, N.D. Tolmacheva // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42 (17). – P. 12448–12457. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.058 (дата обращения 25.11.2019).
- Столяров К.П., Григорьев Н.Н. Введение в люминесцентный анализ неорганических веществ. – Л.: Химия, 1967. – 364 с.
- 45. Динамика спектров люминесценции кристаллофосфоров ZnS-Cu, ZnS-Ag в атомарном водороде / В.Д. Хоружий, Ю.И. Тюрин, В.В. Стыров, Ю.А Сивов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2008. – Т. 72. – № 7. – С. 978–982.
- 46. Эффективность передачи энергии адсорбции и рекомбинации атомов твердому телу при различных механизмах возбуждения / Ю.И. Тюрин, В.Д. Хоружий, С.Х. Шигалугов, Ю.А. Сивов, Т.В. Смекалина // Известия томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 56–65.
- 47. Nonequilibrium electronic phenomena and the chemical energy accommodation during heterogeneous recombination of atomic hydrogen on the manganese doped willemite / D.V. Grankin, V.P. Grankin, V.V. Styrov, M. Sushchikh // Chemical Physics Letters. 2016. V. 647. P. 145-149. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2016.01.049
- Шигалугов С.Х. Исследование взаимодействия неравновесных кислородосодержащих газовых сред с твердыми телами люминесцентными методами: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск, 2005. – 262 с.

Поступила 02.12.2019 г.

Информация об авторах

Тюрин Ю.И., доктор физико-математических наук, профессор отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ван Яомин, аспирант отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сыпченко В.С., кандидат физико-математических наук, доцент отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Никитенков А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. UDC 543.422.6:543.426

METHOD OF FLUORESCENT CONTROL OF PLASMA STRUCTURE AND TREATED SURFACE IN TECHNIQUE OF DOWNHOLE EQUIPMENT ANTICORROSION PROTECTION

Yury I. Tyurin¹,

tyurin@tpu.ru

Wang Yaoming¹,

jldxwym@mail.ru

Vladimir S. Sypchenko¹,

sypchenkov@mail.ru

Aleksey N. Niktenkov¹,

nik@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Reliability and integrity of oil production equipment, its operation time are provided by a set of measures to combat corrosion, in particular, to use gas-plasma sputtering of protective coatings on designed or restored technology parts. In these technologies, the heterogeneous chemiluminescence phenomenon can serve as an effective method for monitoring plasma composition state and the sputtered surface quality. Heterogeneous chemiluminescence reactions has selectivity and high sensitivity to surface type and excitation gas grade. The use of optical methods to study and control in non-equilibrium gas-solid systems opens up new analytical possibilities in surface physics, chemistry, plasma chemistry, semiconductor and phosphor technology, and in solving environmental problems. Study of adsorption, desorption, dissociation, diffusion, gas particles recombination, defect formation and crystal lattice growth using heterogeneous chemiluminescence phenomenon is an urgent task in condensed matter physics, as the heterogeneous chemiluminescence phenomenon realizes the possibility of selective rapid analysis methods with simple hardware equipment at detection limit of free atoms, radicals, impurities in gas phase and the surface layers composition condensed matter to 10^{-6} % (mol).

The main aim of the research is to study the processes in non-equilibrium systems gas-solid and to determine the interaction based on the registration of characteristics of heterogeneous chemiluminescence; to develop the methods for determining time-dependent interaction parameters of gas-solid using heterogeneous chemiluminescence phenomenon, to monitor the parameters of gaseous medium and the state of condensed matter surface.

Objects: atomic-molecular hydrogen beams, crystalline phosphorus $ZnS-Mn^{2+}$, near-surface gas-solid interaction regions. **Methods:** methods based on heterogeneous chemiluminescence phenomenon in atomic hydrogen for determining adsorption rate and H atoms recombination, H_2 molecules desorption rate, heat of hydrogen atoms desorption from $ZnS-Mn^{2+}$ surface. Using the «dark» pause method, the recombination rate of adsorbed atoms was obtained by the Langmuir–Hinshelwood mechanism.

Results. The authors have carried out the comparative study of ZnS-Mn²⁺luminescence upon light (photoluminescence) and atomic hydrogen (heterogeneous chemiluminescence) excitation. Spectral-kinetic characteristics of luminescence were studied and mechanisms and parameters of interaction of hydrogen atoms with zinc sulfide surface (cross sections, frequency factors, activation energies) based on the kinetic characteristics of heterogeneous chemiluminescence were determined. It is shown that the ZnS-Mn²⁺ phosphor can serve as an express sensor reducing plasma component (hydrogen). Heterogeneous chemiluminescence phenomenon is an effective method to control the initial step of modification and composition of solids surface in beam-plasma treatment of materials.

Key words:

Oil and gas equipment, corrosion, protective coatings, gas-plasma spraying, photoluminescence, heterogeneous chemiluminescence, surface, hydrogen atoms, non-stationary processes, interactions of hydrogen atoms with the surface.

REFERENCES

- Ivanovsky V.N. Korroziya skvazhinnogo oborudovaniya i sposoby zashchity ot nee [Corrosion of downhole equipment and methods of protection against it]. *Corrosion. Territory of oil and gas*, 2011, no. 1 (18), pp. 18–25.
- Primenenie technology gazotermicheskogo napyleniya dlya resheniya zadach povysheniya resursa oborudovaniya i sooruzheny. Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu «Ural – Tekhnologicheskie sistemy pokryty» [Using thermal spraying technology to solve the problems increasing the resource of equipment and structures. Limited Liability Company «Ural – Technological Coating Systems»] 2019. Available at: https://ural-tsp.ru/wp-content/uploads/2019/01/prezent.pdf (accessed 25 November 2019).
- Grankin D.V. Chemoluminescence of a UV-Irradiated Zn₂SiO₄-Mn Crystal Exposed to Hydrogen Atoms. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2008, vol. 92 (4). pp. 816-818.

- Li Q., Zhang L., Li J., Lu C. Nanomaterial-amplified chemiluminescence systems and their applications in bioassays. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2011, vol. 30 (2), pp. 401-413.
- Lin Z., Xue W., Chen H., Lin J.-M. Classical oxidant induced chemiluminescence of fluorescent carbon dots. *Chemical Communications*, 2012, vol. 48, pp. 1051–1053.
- Chen H., Lin L., Li H., Lin J.-M. Quantum dots-enhanced chemiluminescence: mechanism and application. *Coordination Chemi*stry Reviews, 2014, vol. 263-264, pp. 86-100.
- Chen H., Lin L., Lin Z., Lu C., Guo G., Lin J.-M. Flow-injection analysis of hydrogen peroxide based on carbon nanospheres catalyzed hydrogen carbonate-hydrogen peroxide chemiluminescent reaction. *Analyst*, 2011, vol. 136, pp. 1957–1964.
- 8. Chen H., Xue W., Lu C., Li H., Zheng Y., Lin J.-M. Plasmonic luminescent core-shell nanocomposites-enhanced chemiluminescence arising from the decomposition of peroxomonosulfite. *Spec*

trochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2013, vol. 116, pp. 355–360.

- Giokas D.L., Vlessidis A.G., Tsogas G.Z., Evmiridis N.P. Nanoparticle-assisted chemiluminescence and its applications in analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2010, vol. 29 (10), pp. 1113–1126.
- Zhang Dingkun, Lin Jin-Ming. Recent development of gas-solid phase chemiluminescence. *Journal of Analysis and Testing*, 2017, vol. 1 (4), pp. 267-273.
- Guan W., Zhou W., Han D., Zhang M., Lu C., Lin J.-M. One-step enrichment and chemiluminescence detection of sodium dodecyl benzene sulfonate in river water using Mg-Al-carbonate layered double hydroxides. *Talanta*, 2014, vol. 120, pp. 268–273.
- Qu J., Chen H., Lu C., Wang Z., Lin J.-M. On-line solid phase extraction of humic acid from environmental water and monitoring with flow-through chemiluminescence. *Analyst*, 2012, vol. 137, pp. 1824–1830.
- Shah S.N., Lin J.M. Recent advances in chemiluminescence based on carbonaceous dots. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, vol. 241, pp. 24–36. DOI: 10.1016/j.cis.2017.01.003.
- 14. Tobos C.I., Kim S., Rissin D.M., Johnson J.M., Douglas S., Yan S., Nie S., Rice B., Sung K.J., Sikes H.D., Duffy D.C. Sensitivity and binding kinetics of an ultra-sensitive chemiluminescent enzyme-linked immunosorbent assay at arrays of antibodies. *Journal of Immunological Methods*, 2019, vol. 474, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jim.2019.112643.
- Wang X., Lin J.M., Liu M.L., Cheng X.L. Flow-based luminescencesensing methods for environmental water analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2009, vol. 28 (1), pp. 75–87.
- Lin Z., Chen H., Lin J.-M. Peroxide induced ultra-weak chemiluminescence and its application in analytical chemistry. *Analyst*, 2013, vol. 138 (18), pp. 5182–5193.
- Liu J., Chen H., Lin Z., Lin J.-M. Preparation of surface imprinting polymer capped Mn-doped ZnS quantum dots and their application for chemiluminescence detection of 4-nitrophenol in tap water. *American Chemical Society*, 2010, vol. 82, pp. 7380–7386.
- Chen H., Li R., Li H., Lin J.-M.. Plasmon-assisted enhancement of the ultraweak chemiluminescence using Cu/Ni metal nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, vol. 116, pp. 14796–14803.
- Mestre Y.F., Zamora L.L., Calatayud J.M. Flow-chemiluminescence: a growing modality of pharmaceutical analysis. *Luminescence*, 2001, vol. 16, pp. 213–235.
- Dodeigne C., Thunus L., Lejeune R. Chemiluminescence as diagnostic tool. A review. *Talanta*, 2000, vol. 51, pp. 415–439.
- Styrov V.V., Tolmacheva N.D., Tyurin Y.I., Shigalugov S.K., Khoruzhii V.D., Sivov Y.A., Plotnicova E.Yu., Sypchenko V.S.. On the heterogeneous chemiluminescence of Y₂O₂S crystal phosphors activated by europium. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, vol. 8, pp. 1158–1160.
- Shigalugov S.K., Tyurin Y.I., Styrov V.V., Tolmacheva N.D. Heterogeneous chemiluminescence of crystallophosphor catalysts in the CO+O mixture. *Kinet Catal.*, 2000, vol. 41, pp. 531–537.
- 23. Grankin D.V., Bazhin A.I., Grankin V.P. Generation of high-energy electrons in a metal under the impact of thermal hydrogen atoms and plasma deuterium. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, vol. 82 (2), pp. 159–162.
- Grankin D.V., Styrov V.V., Simchenko S.V., Grankin V.P., Gural'nik O.A. Oxidation of hydrogen on palladium: Chemicurrents in the Schottky nanodiode. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2017, vol. 91 (2), pp. 295–300.
- Gorbachev A.F., Styrov V.V., Tolmachev V.M., Tyurin Yu.I. Electron accommodation during hydrogen atom adsorption on a juvenile surface of a zinc sulfide single crystal. *Sov. Phys. JETP*, 1986, vol. 64 (1), pp. 99–109.
- Gorbachev A.F., Styrov V.V., Tolmachev V.M., Tyurin Yu.I. Avtorskoe svidetelstvo no. 1603257 (SSSR). Sposob izmereniya ad-

sorbtsionno-aktivnykh gazov [Copyright certificate 1603257 USSR. Method for measuring adsorption-active gases]. *Discoveries. Inventions*, 1990, no. 40, pp. 23–28.

- Shigalugov S.H., Dubrov D.V. Chemiluminescence Y₂O₃:Bi³⁺ induced by nitrogen oxide. *RASAYAN Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12 (4), pp. 2097–2102.
- Styrov V.V., Tyurin Yu.I., Shigalugov S.Kh. Metody lyuminestsentnogo analiza, osnovannye na yavlenii geterogennoy khemilyuminestsentsii [Methods of luminescent analysis based on the phenomenon of heterogeneous chemiluminescence]. Factory laboratory, 1991, vol. 57, no. 11, pp. 1–5.
- Khemilyuminesstentny analizator ozona v atmosfernom vozdukhe [Chemiluminescent analyzer of ozone in atmospheric air (3.02 P-A)]. Available at: http://www.optec.ru/produktsiya.html?c_dept_id=16&c_good_id=15 (accessed 25 November 2019).
- 30. Song Chunyan, Chen Bing, Chen Yunchao, Fan Xianping. Microstructures and luminescence behaviors of Mn²⁺ doped ZnS nanoparticle clusters with different core shell assembled orders *Journal* of Alloys and Compounds, 2014, vol. 590, pp. 546–552. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.12.169
- Murugadoss G., Rajamannan B., Madhusudhanana U. Synthesis and characterization of water-soluble ZnS: Mn²⁺ nanocrystals. *Chalcogenide Letters*, May 2009, vol. 6 (5), pp. 197–201.
- 32. Rema Devi B.S., Raveendran R., Vaidyan A.V. Synthesis and characterization of Mn²⁺doped ZnS nanoparticles synthesis and characterization of nanoparticles. *Pramana Journal of Physics*, April 2007, vol. 68 (4), pp. 87–89. DOI: https://doi.org/10.1007/s12043-007-0068-7
- 33. Ye Changhui, Fang Xiaosheng, Li Guanghai, Zhang Lide. Origin of the green photoluminescence from zinc sulfide nanobelts. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, pp. 3035–3037. Available at: https://doi.org/10.1063/1.1807018 (accessed 25 November 2019).
- 34. Vishwakarma H.L., Archana Sharan, Anju Singh. Studies on the synthesis and characterization of nano phosphors for field emission devices. *International Journal of Science and Research* (*IJSR*), June 2014, vol. 3 (6), pp. 219–222. Paper ID: 02013895
- Korotchenkov O.A., Cantarero A., Shpak A.P., Kunitskii Yu.A., Senkevich A.I., Borovoy M.O., Nadtochii A.B. Doped ZnS: Mn nanoparticles obtained by sonochemical synthesis. *Nanotechnology*, 2005. vol. 16, no. 10, pp. 2033–2038. Available at: https://doi. org/10.1088/0957-4484/16/10/008 (accessed 25 November 2019).
- 36. Priya L. Synthesis and characterization of photoluminescent PVA/ZnS: Mn²⁺ nanocomposites synthesis and characterization of photoluminescent. *Mapana Journal of Sciences*, 2013, vol. 12, pp. 31–37. Available at: https://doi.org/10.1088/0957-4484/ 16/10/008 (accessed 25 November 2019).
- Ru-Shi Liu. Phosphors, up conversion nano particles, quantum dots and their applications. Berlin, Heidelberg, Springer, 2017. 593 p. DOI 10.1007/978-3-662-52771-9
- Shigalugov S.Kh. Installation for studying interaction of solids with nonequilibrium hydrogen-containing gaseous media by luminescent techniques. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Univer*sity, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 57–64. In Rus.
- Tollefson E.L., Le Roy D.J. The Reaction of Atomic Hydrogen with Acetylene. *The Journal of Chemical Physics*, 1948, vol. 16, no. 11, pp. 1055–1062. Available at: https://doi.org/10.1063/ 1.1746724 (accessed 25 November 2019).
- Zakharchenya V.P., Kopylyansky A.A. Spektroskopiya kristallov [Spectroscopy of crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 99 p.
- Bersuker I.B. Elektronnoe stroenie i svoystva koordinatsionnykh soyedineniy [Electronic structure and properties of coordination compounds]. Leningrad, Khimiya Publ., 1976. 352 p.
- Tanabe Y., Sugano S. On the absorption spectra of complex ions. Journal of the Physical Society of Japan, 1954, vol. 9, no. 5, pp. 766-779.

- Tyurin Y.I., Nikitenkov N.N., Sigfusson I.T., Hashhash A., Van Y., Tolmacheva N.D. Generation of excited electronic states at the nonmetal surface by the hydrogen atoms beam. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42 (17), pp. 12448–12457. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.058 (accessed 25 November 2019).
- 44. Stolyarov K.P., Grigoriev N.N. Vvedenie v lyuminestsentny analiz neorganicheskikh veshchestv [Introduction to the luminescent analysis of inorganic substances]. Leningrad, Khimiya Publ., 1967. 364 p.
- Khoruzhii V.D., Tyurin Yu.I., Styrov V.V., Sivov Yu.A. Dynamics of the luminescence spectra of ZnS-Cu and ZnS-Ag crystalline phosphors in atomic hydrogen. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*, 2008, vol. 72, no. 7, pp. 978–982.
- 46. Tyurin Yu.I., Khoruzhiy V.D., Shigalugov S.H., Sivov Yu.A., Smekalina T.V. Efficiency of transfer of adsorption energy and atom recombination to a solid at various excitation mechanisms.

Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2012, vol. 76 (6), pp. 687–689.

- 47. Grankin D.V., Grankin V.P., Styrov V.V., Sushchikh M. Nonequilibrium electronic phenomena and the chemical energy accommodation during heterogeneous recombination of atomic hydrogen on the manganese doped willemite. *Chemical Physics Letters*, 2016, vol. 647, pp. 145–149. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.cplett.2016.01.049 (accessed 25 November 2019).
- 48. Shigalugov S.Kh. Issledovanie vzaimodeystviya neravnovesnykh kislorodosoderzhashchikh gazovykh sred s tverdymi telami lyuminestsentnymi metodami. Avtoreferat Dis. Doct. nauk [Luminescence of solids surface excited in heterogeneous reactions with oxygen and oxygen-containing particles. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2005. 36 p.

Received: 2 December 2019.

Information about the authors

Yury I. Tyurin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Wang Yaoming, Graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir S. Sypchenko, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey N. Niktenkov, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова Дизайн обложки Т.В. Буланова

Фотографии на обложке взяты из личного архива Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 29.12.2019. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл. печ. л. 23,50. Уч.-изд. л. 21,25. Заказ 270-19. Тираж 500 экз.



Издательство