

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 12, 2016

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство 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

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

Volume 327, № 12, 2016

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

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2016

AIMS AND 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 Communications).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Исследование нелинейной динамики составных элементов конструкций для нефтеперерабатывающих и химических производств**
Салтыкова О.А., Захарова А.А., Вецель С.С., Крысько В.А.
- Оценка ртутного загрязнения в окрестностях предприятий нефтехимического комплекса в зимний период (на примере г. Павлодар, республика Казахстан)**
Шахова Т.С., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А., Ляпина Е.Е.
- Асинхронный электропривод каротажных подъемников визуального контроля технического состояния скважин**
Чернышева Т.А., Журиков С.А., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А.
- Автономная система электропитания с экстремальным регулированием мощности первичных источников энергии**
Донцов О.А., Иванчуря В.И., Краснобаев Ю.В., Пост С.С.
- Экспериментальное исследование двухфазного потока в вертикальной трубе в режиме газлифта**
Евсеев А.Р.
- К проблемам конверсии технологий разработки металлических месторождений**
Голик В.И., Разоренов Ю.И., Лукьянов В.Г.
- Агрегирование и коагуляция асфальтенов пленке нефти: физические характеристики продуктов поверхностных отложений**
Коржов Ю.В., Орлов С.А.
- Управление кавитацией на двумерном гидрокрыле посредством непрерывной тангенциальной инъекции**
Тимошевский М.В., Запрягаев И.И., Первунин К.С., Мальцев Л.И., Маркович Д.М., Ханъялич К.
- Схемотехническое моделирование процессов проявления частичных разрядов**
Стругов В.В., Лавринович В.А.
- Адаптивная идентификация жизненного цикла систем методом интегрированных феноменологических моделей с переменными параметрами**
Сергеев В.Л., Нгуен К.Х., Нгуен Т.Х.Ф.
- Новая методика определения степени коррозионного поражения элементов систем трубопроводного транспорта**
Чичерин С.В.
- 6 Investigation of nonlinear dynamics of structure components for oil refining and chemical industries**
Saltykova O.A., Zakharova A.A., Vetsel S.S., Krysko V.A.
- 16 Assessment of mercury pollution in the vicinity of petrochemical complex in winter (by the example of Pavlodar, Kazakhstan)**
Shakhova T.S., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lyapina E.E.
- 26 Induction drive of well logging truck hoist for visual monitoring the borehole operating conditions**
Chernysheva T.A., Zhurikov S.A., Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A.
- 34 Autonomous power supply system with maximum power point tracking of primary energy sources**
Dontsov O.A., Ivanchura V.I., Krasnobaev Yu.V., Post S.S.
- 45 Experimental study of two-phase flow in vertical tube in gas lift mode**
Evseev A.R.
- 54 On the issue of conversion of metal deposit development techniques**
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Lukyanov V.G.
- 62 Aggregation and coagulation of asphaltenes in oil film: physical characteristics of surface deposit products**
Korzhev Yu.V., Orlov S.A.
- 75 Cavitation control on a two-dimensional hydrofoil by means of continuous tangential injection**
Timoshevskiy M.V., Zapryagaev I.I., Pervunin K.S., Maltsev L.I., Markovich D.M., Hanjalić K.
- 91 Circuit simulation of partial discharge aspects**
Strugov V.V., Lavrinovich V.A.
- 101 Adaptive identification of system lifecycle by the method of integrated phenomenological models with variable parameters**
Sergeev V.L., Nguyen H.Q., Nguyen Ph.T.H.
- 110 New approach to determination of corrosion damage degree of pipeline system elements**
Chicherin S.V.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Салтыкова Ольга Александровна^{1,2},
olga_a_saltykova@mail.ru

Захарова Алена Александровна²,
zaa@tpu.ru

Вецель Сергей Сергеевич¹,
sergikvec@mail.ru

Крысько Вадим Анатольевич¹,
tak@san.ru

¹ Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Цель работы: создание математической модели и изучение нелинейной динамики и контактного взаимодействия сложной механической балочно-оболочечной структуры, находящейся под действием внешней нагрузки. К основным свойствам конструкций, составными частями которых являются рассматриваемые балочно-оболочечные структуры, можно отнести: высокую износостойкость, устойчивость к различным типам внешних воздействий. Исследование может способствовать улучшению указанных свойств.

Актуальность. Ввиду широкого спектра применения балочно-оболочечных конструкций в современной нефтеперерабатывающей и химической промышленности, актуальными являются вопросы изучения их нелинейной динамики и контактного взаимодействия. Примером применения таких структур могут служить теплообменники типа «труба в трубе» и колонны насосно-компрессорных труб. Моделирование и исследование динамики балочно-оболочечных конструкций дает представление о влиянии внешних и внутренних факторов на работу изучаемых объектов. Это позволяет прогнозировать и управлять работой описанных конструкций. В работе рассматривается конструкция из двух вложенных друг в друга замкнутых цилиндрических оболочек, подкрепленных балкой с внешней стороны. Между балкой и оболочками есть зазоры. На балку действует распределенная по поперечности знакопеременная нагрузка. Задача решается в трехмерной постановке с учетом больших деформаций.

Методы. В качестве исходных уравнений для балки и оболочек взяты уравнения с учетом геометрической нелинейности и больших деформаций по В.В. Новожилову в трехмерной постановке. Контактное давление определяется по методу Б.Я. Кантора. Уравнения в частных производных для балки и оболочки сводятся к задаче Коши методом конечных элементов по пространственным переменным. Задача Коши решается методом явного интегрирования (методом Эйлера). Решается задача в консервативной постановке. Анализ осуществляется методами нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений: строятся сигналы, фазовые портреты, сечения Пуанкаре, фурье-спектры, применяются вейвлет-преобразования и анализ знаков показателей Ляпунова. Изучается синхронизация колебаний элементов структуры.

Результаты исследования и выводы. Проведено исследование частотных характеристик элементов структуры на базе вейвлет анализа и спектров мощности Фурье. Приводится визуализация нелинейных колебаний элементов изучаемой структуры. Для описанной структуры впервые обнаружено явление хаотической фазовой синхронизации. Сделан вывод о предпочтении использования вейвлет анализа для исследования подобных систем, так как он позволяет выявить частотные характеристики элементов системы в каждый момент времени.

Ключевые слова:

Хаотическая динамика, метод конечных элементов, цилиндрические оболочки, вложенные одна в другую, балка, контактное взаимодействие.

Введение

В нефтегеологической науке, механике, химии XXI в. преобладают идеи современной нелинейной динамики с ее концепциями хаоса и самоорганизации. Технологическое оборудование современного нефтеперерабатывающего и химического производства представляет собой комплекс аппаратов, машин и вспомогательных устройств, составными частями которых являются замкнутые цилиндрические оболочки и балки, подвергающиеся различным динамическим нагрузкам. Так, например, замкнутые цилиндрические оболочки, вложенные друг в друга, являются основными составными

элементами теплообменников типа «труба в трубе» [1], а цилиндры, подкрепленные ребрами, широко используются в колоннах насосно-компрессорных труб, используемых при скважинной нефтедобыче [2]. При разработке и проектировании описанных конструкций ответственного назначения необходимо изучать и учитывать влияние на их динамику не только факторов внешнего воздействия, но и контактное взаимодействие элементов. В связи с чем актуальным является вопрос изучения нелинейной динамики и контактного взаимодействия замкнутых цилиндрических оболочек, подкрепленных балкой.

Новые явления и подходы к изучению нелинейной динамики балок, пластин и оболочек можно отметить в работах [3–8]. НДС и устойчивость нелинейно-упругих цилиндрических оболочек, находящихся под действием различных нагрузок, изучается в работах [9–13]. Отдельным предметом современных исследований является вопрос о контактном взаимодействии балок, пластин и оболочек. Теоретические основы контактных задач заложены в работе [14]. Работа [15] посвящена экспериментальному контактному взаимодействию пластин и оболочек. Нужно отметить и большое количество работ по многослойным механическим системам [16, 17], а также работы по синхронизации хаотических систем [18]. При решении задач нелинейной динамики механических структур встает вопрос выбора метода решения. Одним из самых распространенных является метод конечных элементов, который реализован в программном комплексе ANSYS [19].

В результате анализа российской и зарубежной литературы можно сделать вывод, что проблема нелинейной динамики и контактного взаимодействия описанных выше сложных балочно-оболочечных структур до настоящего времени остается не исследованной. В работе [20] впервые изучается контактное взаимодействие и нелинейная динамика замкнутой цилиндрической оболочки, подкрепленной балкой с внешней стороны. Данная работа является продолжением [20], где мы увеличили количество элементов структуры. Настоящая работа позволит ответить на некоторые вопросы, связанные с нелинейной динамикой сложных механических систем в виде двухслойных замкнутых цилиндрических оболочек, подкрепленных балкой с внешней стороны.

Контактное взаимодействие двух вложенных одна в другую замкнутых цилиндрических оболочек, подкрепленных балкой с внешней стороны

При решении этой задачи исходными дифференциальными уравнениями приняты уравнения В.В. Новожилова [21] для двумерной деформации бесконечно длинной полосы. Эти формулы получены из уравнения для пластины в предположении, что перемещение $v=0$. По мнению В.В. Новожилова, это предположение фактически формулирует задачу об изгибе балки:

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = 0, \varepsilon_{xx} = \hat{\varepsilon}_{xx} + z\chi_{xx} + z^2\gamma_{xx},$$

где

$$\hat{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial x} \right)^2 \right],$$

$$\chi_{xx} = \left(1 + \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} \right) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial \hat{w}}{\partial x} \frac{\partial \chi}{\partial x},$$

$$\gamma_{xx} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \chi}{\partial x} \right)^2 \right], \theta = -\frac{\partial \hat{w}}{\partial x}, \chi = \frac{\partial \hat{u}}{\partial x}. \quad (1)$$

Здесь \hat{u} , \hat{w} есть перемещение срединной линии балки. Материал балки считается упругим и подчиняется закону Гука.

Исходные уравнения для оболочек, которые учитывают квадраты первых производных от перемещения срединной поверхности оболочки \hat{u} , \hat{v} , \hat{w} , так же как и для балки, получаем из теории В.В. Новожилова. Ввиду громоздкости уравнений равновесия и уравнений совместности деформации в данной работе они не приводятся. Но отметим, что компоненты деформации взяты в следующем виде:

$$\varepsilon_{xx_i} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_i} \right)^2 \right];$$

$$\varepsilon_{xy_i} = \frac{\partial u_i}{\partial y_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial y_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \frac{\partial v_i}{\partial y_i} + \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \frac{\partial w_i}{\partial y_i}.$$

ε_{yy_i} , ε_{zz_i} , ε_{xz_i} , ε_{yz_i} могут быть получены аналогичным образом, с помощью круговой подстановки индексов.

Граничные условия:

а) для балки:

$$\text{при } x = 0, y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2} \right],$$

$$z \in [-h; h]: u(x, y, z) = 0,$$

$$v(x, y, z) = 0, w(x, y, z) = 0;$$

$$\text{при } x = L, y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2} \right],$$

$$z \in [-h; h]: u(x, y, z) = 0,$$

$$w(x, y, z) = 0.$$

б) для оболочек:

$$\text{при } x_i = 0, y \in [0 \pm R_i; 0 \pm (R_i + h_i)],$$

$$z \in [-h_i; h_i]: u_i(x, y, z) = 0,$$

$$v_i(x, y, z) = 0, w_i(x, y, z) = 0;$$

$$\text{при } x_i = L, y \in [0 \pm R_i; 0 \pm (R_i + h_i)],$$

$$z \in [-h_i; h_i]: u_i(x, y, z) = 0,$$

$$w_i(x, y, z) = 0, i = 1, 2. \quad (2)$$

Начальные условия:

$$u_i(0, x, y, z) = v_i(0, x, y, z) = w_i(0, x, y, z) = 0,$$

$$\dot{u}_i(0, x, y, z) = \dot{v}_i(0, x, y, z) = \dot{w}_i(0, x, y, z) = 0,$$

$$i = 1, 2. \quad (3)$$

К внешней поверхности балки приложена распределенная знакопеременная нагрузка вида

$$q_2(x, t) = q_0 \sin(\omega_p t), \quad (4)$$

где ω_p – частота вынуждающих колебаний.

Методы решения

Уравнения в частных производных для балки и оболочек сводятся к задаче Коши методом конечных элементов (по пространственным переменным). Конечно-элементная модель каждой оболоч-

ки содержит около 25 тысяч узлов, а для балки – 16 тысяч элементов. По толщине и ширине балка разбита тремя конечными элементами, а по длине – 50-ю. Количество элементов по толщине и длине объектов выбиралось на основе принципа Рунге.

В работе использован трехмерный объемный 8-узловой конечный элемент с равномерным распределением напряжений по объему. Расчет выполнен с использованием типа подавления искажений формы элементов с точным интегрированием по объему по форме Фланаган–Белычко. Материал оболочек и балки сталь 12Х18Н10Т со следующими физико-механическими свойствами [22]: $E=20\,900\text{ кгс/мм}^2$ – модуль Юнга; $\mu=0,3$ – коэффициент Пуассона; $\rho=8\cdot 10^{-10}\text{ кгс с}^2/\text{мм}^3$ – плотность.

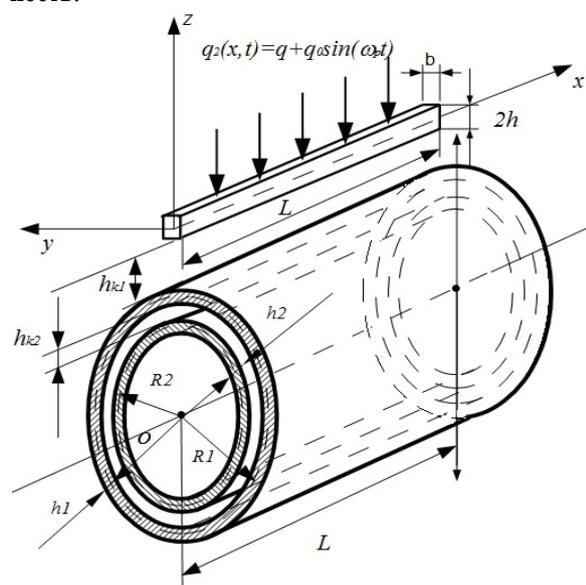


Рисунок. Расчетная схема изучаемой структуры

Figure. Design pattern of the studied structure

Длина оболочек и балки (рис. 1) $L=200$ мм, радиусы оболочек $R_2=100$ мм, $R_1=98$ мм, толщина оболочек $h_1=h_2=2$ мм. Расстояние между элементами структуры $h_{k_1}=h_{k_2}=2$ мм. Толщина балки $2h=10$ мм.

Граничные условия несимметричны, при $x=0$ балка и оболочки жестко закреплены, а при $x=L$ – шарнирно оперты (3).

Задача Коши решается методом явного интегрирования (методом Эйлера). Данная система консервативна.

Анализ численных результатов осуществляется методами нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений. Для каждого элемента структуры строятся сигналы, фазовые портреты, сечения Пуанкаре, автокорреляционные функции, фурье-спектры, применяются вейвлет-преобразования Морле (2D и 3D), определяется знак старшего показателя Ляпунова, используется метод определения фазовой синхронизации с помощью вейвлет-анализа. Вейвлет-преоб-

разования позволяют исследовать изменение частотных характеристик сигнала в каждый момент времени, а не интегрально (как фурье-анализ), что очень важно при изучении хаотической динамики механических систем. Вейвлет-анализ является математическим «микроскопом», позволяющим выявлять частотные характеристики исследуемой структуры.

Проведен сравнительный анализ различных видов материнских вейвлетов [23] и сделан вывод о предпочтении вейвлета Морле при изучении нелинейной динамики описываемой структуры.

Анализ результатов

При анализе нелинейной динамики и контактного взаимодействия двух цилиндрических оболочек, подкрепленных балкой с внешней стороны, амплитуда вынуждающих колебаний знакопеременной нагрузки, действующей на балку, составляла $q_2=6,9,12,15\text{ кгс/мм}^2$. Частота вынуждающих колебаний, $\omega_p=142$ Гц, близка к частоте собственных колебаний балки. Исследование проводилось на основе анализа сигналов, фурье-спектров, 2D- и 3D-вейвлет-спектров, позволяющих получать представление о частотных характеристиках системы в каждый момент времени, фазовых пространств каждого элемента системы (балка, внешняя и внутренняя оболочки). Также построены трехмерные изображения прогибов элементов системы по оси y в разные моменты времени совместно и отдельно при каждой из рассматриваемых амплитуд вынуждающих колебаний. Обратим внимание на обязательное выполнение условия непроникновения элементов системы. Несоблюдение этого условия приводит к значительным погрешностям вычислений.

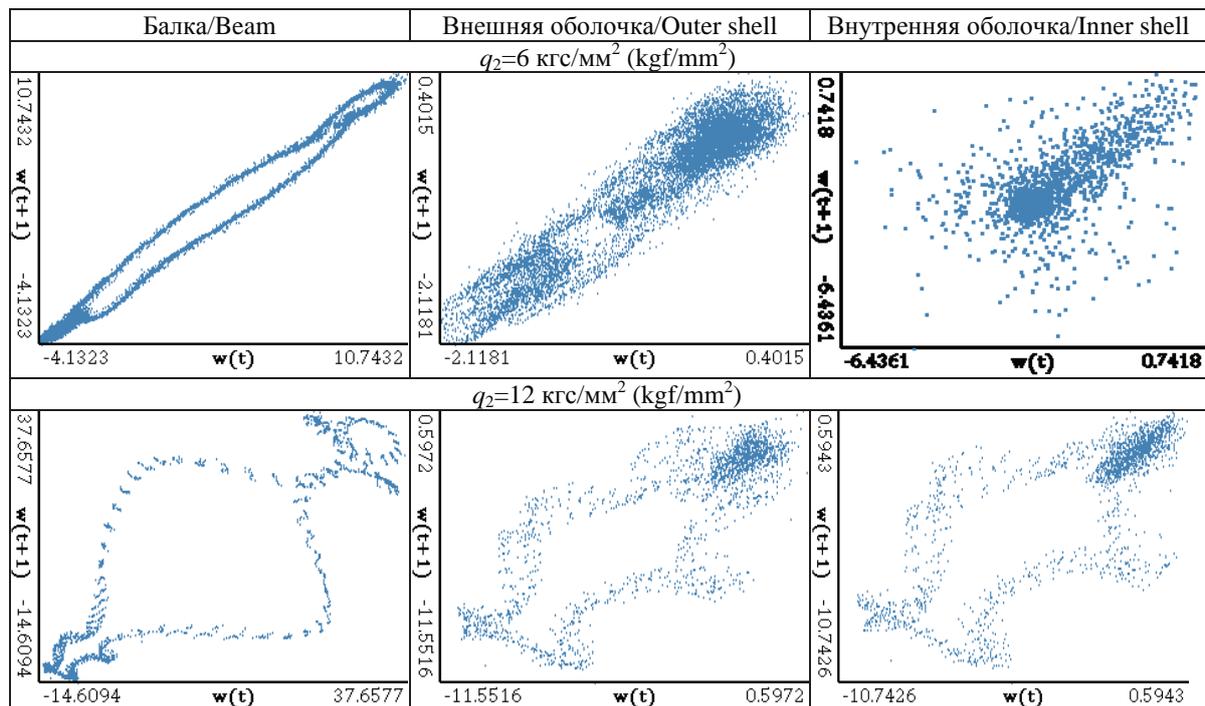
Переход колебаний структуры в хаос происходит сразу после касания элементов структуры. Увеличение амплитуды приводит к более тесному взаимодействию элементов структуры. При касании эти элементы «прилипают» друг к другу. В результате колебания элементов системы синхронизируются с увеличением нагрузки.

Проведем анализ различных динамических характеристик элементов изучаемой структуры. В табл. 1 приведем графики сечения Пуанкаре для каждого элемента при амплитудах внешних вынуждающих колебаний $q_2=6\text{ кгс/мм}^2$ и $q_2=12\text{ кгс/мм}^2$.

Как можно видеть, в обоих случаях сечение Пуанкаре для балки имеет отчетливый контур, а для оболочек рассеивается. Сечения Пуанкаре для оболочек идентичны, что свидетельствует о синхронизации колебательного процесса оболочек. Причем с возрастанием нагрузки синхронизация колебательного процесса увеличивается.

При проведении исследования используется метод изучения фазовой хаотической синхронизации механических динамических систем на базе вейвлет-анализа. Для описания и анализа фазовой хаотической синхронизации вводится фаза хаотического сигнала. Фазовая хаотическая синхрони-

Таблица 1. Сечение Пуанкаре для каждого элемента структуры
Table 1. Poincar' sections for each element of the structure



зация означает, что происходит захват фаз хаотических сигналов, в то время как амплитуды этих сигналов остаются не связанными друг с другом и выглядят хаотическими. Захват фаз влечет за собой совпадение частот сигналов. Частота хаотического сигнала определяется как средняя скорость изменения фазы. В случае применения вейвлетных преобразований вейвлетная поверхность $W(s, t_0) = \sqrt{W(s, t_0) \exp[j\phi_s(t_0)]}$ характеризует поведение системы на каждом временном масштабе s в любой момент времени t_0 . Величина $\sqrt{W(s, t_0)}$ характеризует наличие и интенсивность соответствующего временного масштаба s в момент времени t_0 . Вводится интегральное распределение энергии вейвлетного спектра по временным масштабам $E(s) = \int \sqrt{W(s, t_0)}^2 dt_0$. Фаза определяется как $\phi_s(t_0) = \arg W(s, t)$ для каждого временного масштаба s , то есть возможно характеризовать поведение каждого временного масштаба s с помощью ассоциированной с ним фазы $\phi_s(t)$. Фазовая синхронизация ведет к появлению захвата фаз на синхронизированных временных масштабах $s \sqrt{|\phi_{s_1}(t) - \phi_{s_2}(t)|} < \text{const}$

Приведем 2D-вейвлет-спектры фазовой синхронизации элементов балочно-оболочечной структуры при $q_2=6 \text{ кгс/мм}^2$ для следующих пар элементов: балка – внешняя оболочка; балка – внутренняя оболочка; внешняя оболочка и внутренняя оболочка (табл. 2).

По оси ординат отложено значение разности фаз двух элементов, а по оси абсцисс – время. Чем темнее цвет, тем больше синхронизация колеба-

ний элементов структуры. Так как колебания элементов структуры хаотические с момента касания, то можно говорить о явлении хаотической фазовой синхронизации. Наилучшая синхронизация характерна для оболочек, что можно объяснить отсутствием нагрузки, прикладываемой непосредственно к оболочкам, и одинаковой толщиной и длиной оболочек.

Приведем 2D-вейвлет-спектры Морле и спектры мощности Фурье для каждого элемента изучаемой балочно-оболочечной структуры при $q_2=6 \text{ кгс/мм}^2$ (табл. 3).

Сравнение вейвлет- и фурье-спектров позволяет говорить о некоторых неточностях последнего. Вейвлет-спектры отражают большее количество частот, их включение и выключение на всем временном интервале. Так, на фурье-спектре для оболочек, кроме частоты вынуждающих колебаний $\omega_p=142 \text{ Гц}$, присутствуют две частоты: $\omega_1=15,64 \text{ Гц}$, $\omega_2=125,12 \text{ Гц}$. Причем частоты связаны линейной зависимостью $\omega_p - \omega_1 = \omega_2$. Независимая частота есть и на спектрах мощности балки. Увеличение нагрузки приводит к исчезновению частот ω_1 и ω_2 на спектре мощности внутренней оболочки. 2D-вейвлеты отражают большее количество частот. На них четко выражена перемежаемость частот. При $q_2=9 \text{ кгс/мм}^2$ на 2D-вейвлете внешней оболочки при $t \in (0, 0.2)$ с частота вынуждающих колебаний присутствует, затем исчезает, но при $t \in (0.3, 0.8)$ с появляется снова. При $q_2=12 \text{ кгс/мм}^2$ эта же частота включается-выключается с небольшим сдвигом по времени.

Таблица 2. 2D-вейвлет-спектры фазовой синхронизации элементов структуры

Table 2. 2D wavelet spectra of phase-synchronization of the structure elements

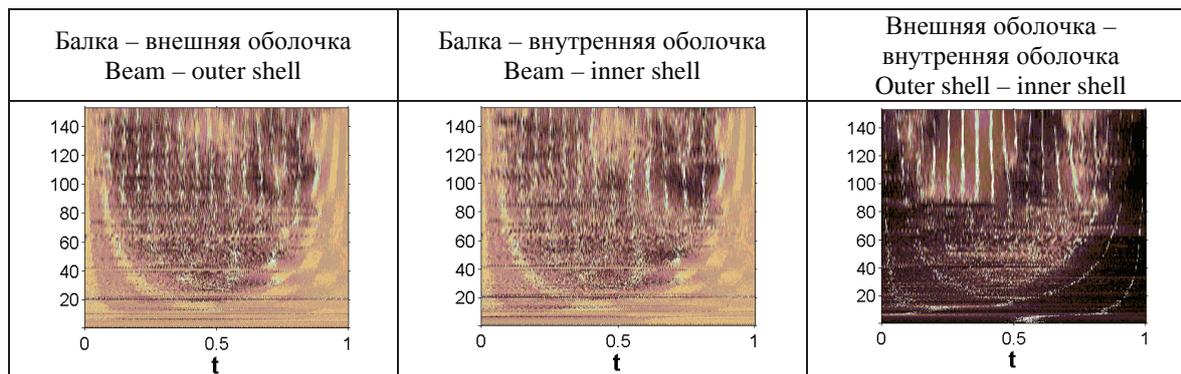
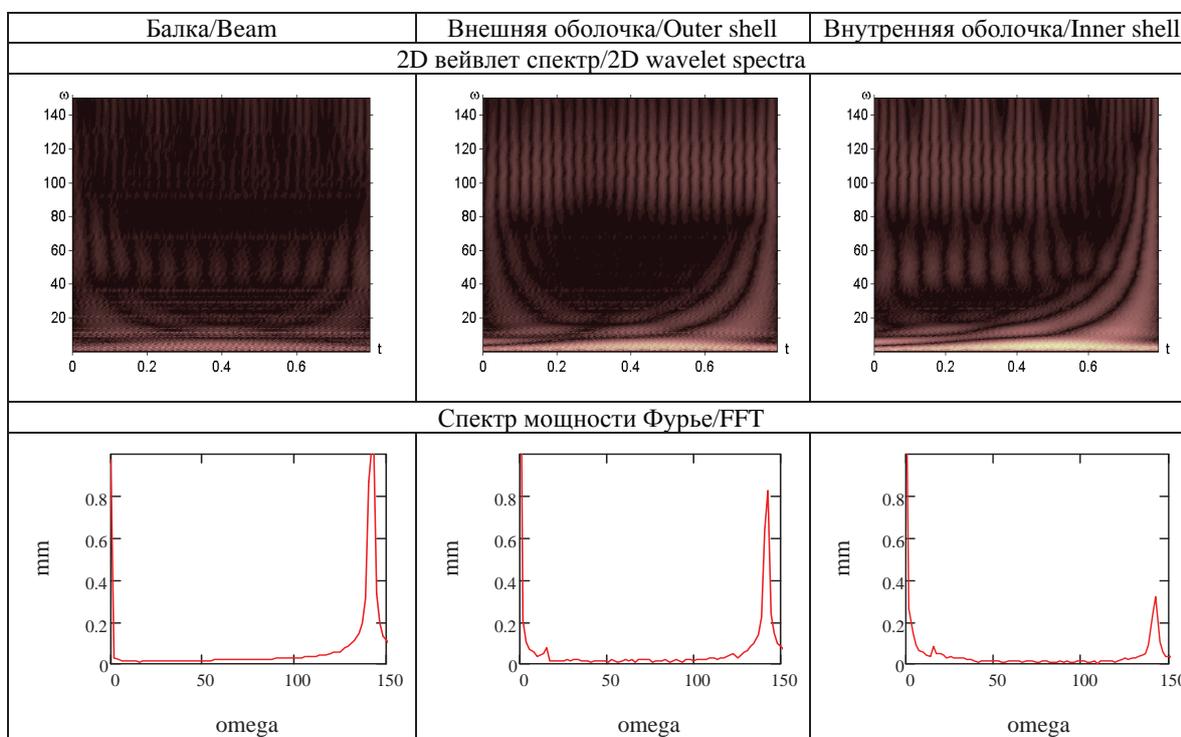


Таблица 3. 2D-вейвлет-спектры и фурье-спектры

Table 3. 2D wavelet spectra and FFT

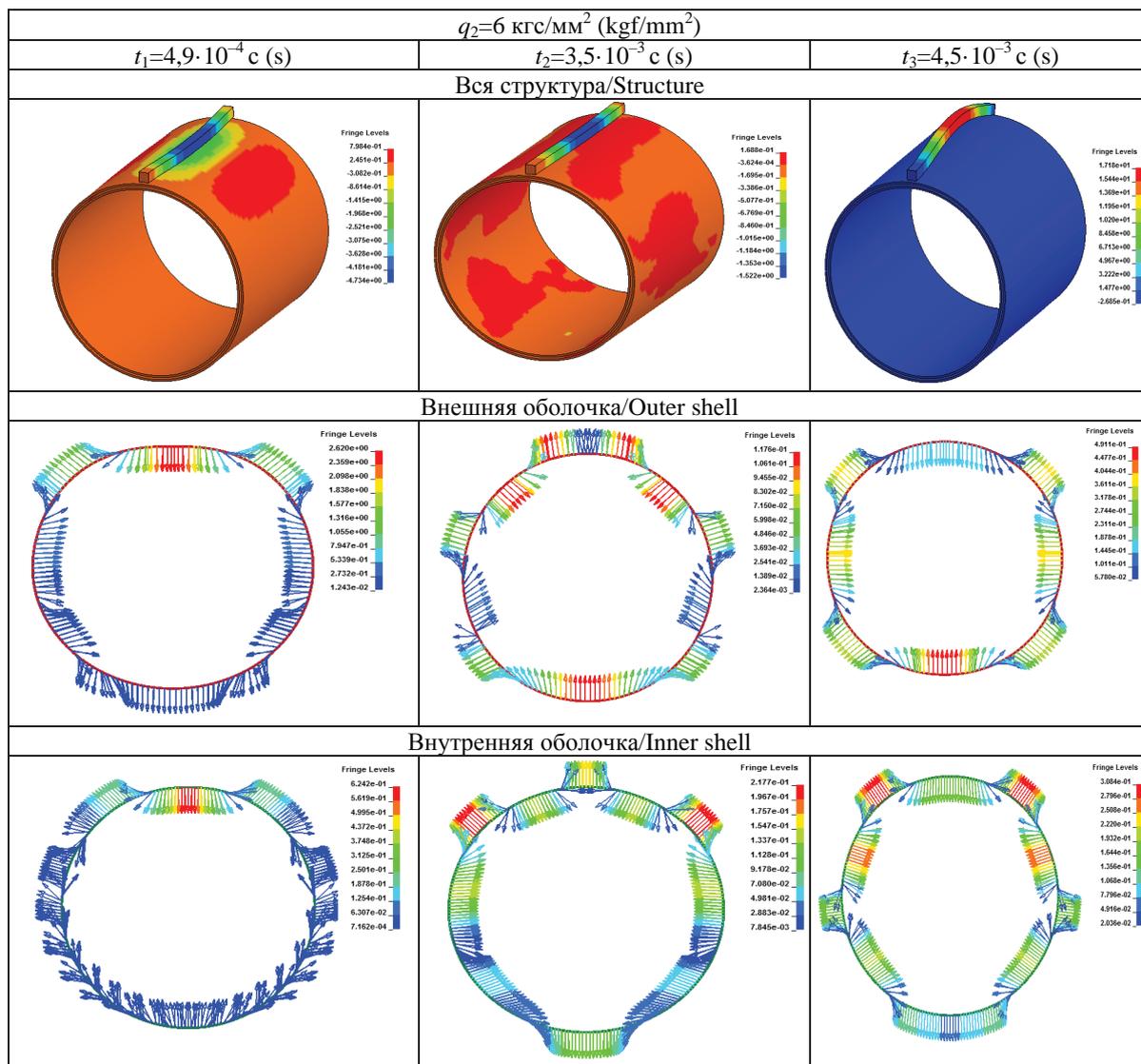


При $q_2=6$ кгс/мм² частота вынуждающих колебаний балки присутствует на всем временном интервале.

В табл. 4 приведены трехмерные изображения перемещений элементов структуры по оси y в разные моменты времени ($t_1=4,9 \cdot 10^{-4}$ с, $t_2=3,5 \cdot 10^{-3}$ с, $t_3=4,5 \cdot 10^{-3}$ с) совместно и отдельно при $q_2=6$ кгс/мм². Поперечные срезы цилиндров с указанием направления их деформации и шкалы величин перемещений также даны в таблице. Цветовая градация векторов – от синего (минимальные прогибы) к красному (наибольшие прогибы).

Трехмерные изображения прогибов приводятся в одни те же моменты времени для разных нагрузок. При $t_1=4,9 \cdot 10^{-4}$ с показан момент касания всех элементов структуры. Наибольшие прогибы приходятся на место соприкосновения балки и оболочки. С ростом амплитуды вынуждающих колебаний в момент времени $t_1=4,9 \cdot 10^{-4}$ с распространение прогибов по поверхности внутренней оболочки наибольшее при $q_2=15$ кгс/мм². При $q_2=6$ кгс/мм² прогибы внутренней и внешней оболочек идентичны. В следующие моменты времени подобного эффекта не наблюдается. Прогибы оболочек распро-

Таблица 4. Трехмерные изображения перемещений по оси y элементов структуры
Table 4. Three-dimensional images of structure elements displacement along the y axis



страняются по всей поверхности и не симметричны относительно центра, что объясняется разными краевыми условиями. В третий момент времени ($t_3=4,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$) прогибы балки максимальны и она отрывается от поверхности внешней оболочки. Внешняя и внутренняя оболочки продолжают взаимодействовать.

Увеличение амплитуды вынуждающих колебаний приводит к более тесному взаимодействию элементов структуры и значительному росту прогибов оболочек и балки. Оболочки вдавливаются балкой, и их колебания в моменты соприкосновения синхронны. В моменты времени, когда балка не касается внешней оболочки, в случае $q_2=12 \text{ кгс/мм}^2$, их колебания также остаются синхронными. При меньшей амплитуде ($q_2=6 \text{ кгс/мм}^2$) подобного эф-

фекта еще не наблюдается. То есть, как уже было отмечено выше, колебания элементов системы синхронизируются с увеличением нагрузки. Отметим, что наибольшие прогибы оболочек приходятся на место их соприкосновения. При $q_2=6 \text{ кгс/мм}^2$ на срезе внешней оболочки наблюдается пять выпуклостей, а на внутренней – четыре. При $q_2=12 \text{ кгс/мм}^2$, наоборот, на срезе внешней оболочки четыре выпуклости, а на срезе внутренней – пять. То есть происходит перестройка колебательного процесса изучаемой системы, а также явление прохлопывания оболочек.

Анализ совпадений количества полувольт оболочек в зависимости от амплитуды вынуждающей нагрузки позволяет говорить об увеличении процента совпадений с увеличением амплитуды. При

$q_2=6$ кгс/мм² совпадений количества полуволн в одни и те же моменты времени нет, при $q_2=9$ кгс/мм² – 16 % совпадений, при $q_2=12$ кгс/мм² – 33 %, при $q_2=15$ кгс/мм² – 48 %.

Заключение

В представленной работе впервые изучены и проанализированы нелинейная динамика и контактное взаимодействие сложной механической системы, состоящей из балки и двух оболочек, вложенных одна в другую, при воздействии на балку внешней знакопеременной нагрузки различной интенсивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банных О.П. Оборудование для нефтехимических производств. Ч. I. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 40 с.
2. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.
3. Deterministic Chaos in One-Dimensional Continuous Systems / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, I.V. Papkova, A.V. Krysko. – Singapore: World Scientific series on Nonlinear Science, 2016. – 515 p.
4. Yan Q., Ding H., Chen L. Nonlinear dynamics of axially moving viscoelastic Timoshenko beam under parametric and external excitations // Applied Mathematics and Mechanics. – 2015. – V. 36. – № 8. – P. 971–984.
5. Savi M.A. Nonlinear dynamics and chaos in shape memory alloy systems // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2015. – V. 70. – P. 2–19.
6. Investigations of chaotic dynamics of multi-layer beams taking into account rotational inertial effects / A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, O.A. Saltykova, M.V. Zhigalov, V.A. Krysko // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2014. – V. 19 (8). – P. 2568–2589.
7. Синичкина А.О., Крылова Е.Ю., Мицкевич С.А., Крысько В.А. Динамика гибких балок при действии ударных нагрузок с учетом белого шума // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78 (3). – С. 280–288.
8. Zhang L. et al. Free vibration of curved thin-walled rectangular beams // Proc. of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. – 2015. – V. 168. – № 12. – P. 943–957.
9. Антоненко Э.В., Шульга Т.Э. Модели подкрепленного стыка двух тонкостенных цилиндров разной толщины // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 4–2. – С. 303–307.
10. Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. Nonstationary 3D Motion of an Elastic Spherical Shell // Mech. Solids. – 2015. – V. 50 (2). – P. 208–217.
11. Христич Д.В. Математическая модель изгиба нелинейно упругих цилиндрических тел // Вестник ТулГУ. Серия: Дифференциальные уравнения и прикладные задачи. – 2008. – № 1. – С. 101–105.
12. Попов О.Н., Моисеенко М.О., Трепутнева Т.А. Влияние симметричных общих начальных прогибов на напряженно-деформированное состояние и устойчивость пологих цилиндрических

Полученные результаты численного эксперимента, качественный анализ полученных сигналов и трехмерной визуализации позволяют иметь четкое и наглядное представление о динамике системы.

Сделан вывод о предпочтении использования вейвлет-анализа для исследования подобных систем, так как он позволяет выявить частотные характеристики каждого элемента структуры в любой момент времени. Исследованы частотные характеристики структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 16-11-10138.

- оболочек // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 4. – С. 34–39.
13. Sadeghzadeh H., Ehyaei M.A., Rosen M.A. Techno-economic optimization of a shell and tube heat exchanger by genetic and particle swarm algorithms // Energy Conversion and Management. – 2015. – V. 93. – P. 84–91.
14. Кантор Б.Я. Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения. – Киев: Наук. думка, 1990. – 135 с.
15. Антуфьев Б.А., Смиян А.Б. Экспериментальное исследование деформации пластин, дискретно соединенных с цилиндрической оболочкой // Известия вузов. Авиационная техника. – № 4. – 2012. – С. 8–10.
16. Морозов Н.Ф., Товстик П.Е. Изгиб двухслойной балки с нежестким контактом между слоями // Прикладная математика и механика. – 2011. – Т. 75. – № 1. – С. 112–121.
17. Андрюшин В.А., Недбай А.А. Вынужденные колебания слоистой цилиндрической оболочки, соединенной точечными упругими связями со слоистой балкой // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2003. – Т. 9. – № 1. – С. 33–41.
18. Nian F., Liu W. Hybrid synchronization of heterogeneous chaotic systems on dynamic network // Chaos, Solitons & Fractals. – October 2016. – V. 91. – P. 554–561.
19. Mahendran G., Chandrasekaran K., Malhotra S.K. Damage Detection in Laminated Composite Beams, Plates and Shells using Dynamic Analysis // Applied Mechanics & Materials. – 2015. – V. 787. – P. 901–906.
20. Nonlinear dynamics and contact interaction of the structures composed of beam-beam and beam – closed cylindrical shell members / A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, O.A. Saltykova, S.S. Vetsel, V.A. Krysko // Chaos, Solitons & Fractals. – October 2016. – V. 91. – P. 622–638.
21. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. – Л.; М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 213 с.
22. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т. 1. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
23. О выборе типа вейвлета при изучении нелинейных колебаний балок с учетом поперечных сдвигов / В.А. Крысько, М.В. Жигалов, В.В. Солдатов, М.Н. Подтуркин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (40). – Вып. 1. – С. 14–22.

Поступила 22.09.2016 г.

Информация об авторах

Салтыкова О.А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина; инженер кафедры инженерной графики и промышленного дизайна Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Захарова А.А., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой инженерной графики и промышленного дизайна Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Вецель С.С., аспирант кафедры математики и моделирования Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина.

Крысько В.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и моделирования Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина.

UDC 539.3

INVESTIGATION OF NONLINEAR DYNAMICS OF STRUCTURE COMPONENTS FOR OIL REFINING AND CHEMICAL INDUSTRIES

Olga A. Saltykova^{1,2},
olga_a_saltykova@mail.ru

Alena A. Zakharova²,
zaa@tpu.ru

Sergey S. Vetsel¹,
sergikvec@mail.ru

Vadim A. Krysko¹,
tak@san.ru

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77, Politehnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The aim of the work is to study the nonlinear dynamics and complex mechanical contact interaction of beam–shell structures. The construction is under the action of the external load. The main properties of the structures, which components are the beam–shell structure, include: high wear resistance, resistance to various types of external influences. The study may help to improve these properties.

The relevance. In view of the wide range of applications of the beam–shell structures in modern oil-refining and chemical industries the issues of nonlinear dynamics and complex contact interaction of beam–shell structures are relevant. The «pipe in pipe» type heat exchangers and tubing column can serve as the example of using such structures. Simulation and study of the dynamics of the beam–shell structures gives an idea about the impact of external and internal factors on operation of the objects under study. This allows predicting and controlling the operation of the described structures. The paper considers the construction of two nested closed cylindrical shells reinforced by a beam from the outside. There are gaps between the beam and the shell. The beam is subjected to the action of the transversal harmonic load. The problem is solved in three-dimensional statement, taking into account large deformation.

The methods used in this study. The equations considering geometrically nonlinear structure and large deformation by V.V. Novozhilov in three-dimensional statement were taken as the initial equations for beam and shells. The contact pressure is determined by B.Ya. Kantor method. Partial differential equations for beams and shells are reduced to the Cauchy problem by the finite element method in the spatial variables. The Cauchy problem is solved by the explicit integration (Euler's method). The conservative structure was considered. The analysis was carried out by the methods of nonlinear dynamics and qualitative theory of differential equations: the authors have formed the signals, phase portraits, Poincare section, Fourier spectra, applied wavelet transform and analysis of signs of the Lyapunov exponents.

The results and conclusions. The authors studied the frequency characteristics of the structural elements based on wavelet analysis and Fourier power spectra. The paper introduces the visualization of nonlinear vibrations of the structure elements. For the first time the chaotic phase synchronization phenomenon was defined for the described structure. The authors concluded on the preference of using wavelet analysis to study such systems. This method reveals the frequency characteristic of the system elements at each time.

Key words:

Chaotic dynamics, finite element method, cylindrical shells nested one inside the other, beam, contact interaction.

The research was supported by the RSF grant no. 16–11–10138.

REFERENCES

1. Bannykh O.P. *Oborudovanie dlya neftekhimicheskikh proizvodstv* [Equipment for petrochemical plants]. P. I. St-Petersburg, ITMO University Press, 2014. 40 p.
2. Ivanovskiy V.N., Darishev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Skvazhynnye nasosnye ustanovki dlya dobychi gaza* [Downhole pumping units for oil extraction]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2002. 824 p.
3. Awrejcewicz J., Krysko V. A., Papkova I.V., Krysko A.V. *Deterministic Chaos in One-Dimensional Continuous Systems*. Singapore, World Scientific series on Nonlinear Science, 2016. 515 p.
4. Yan Q., Ding H., Chen L. Nonlinear dynamics of axially moving viscoelastic Timoshenko beam under parametric and external excitations. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, vol. 36, no. 8, pp. 971–984.
5. Savi M.A. Nonlinear dynamics and chaos in shape memory alloy systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2015, no. 70, pp. 2–19.
6. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Saltykova O.A., Zhigalov M.V., Krysko V.A. Investigations of chaotic dynamics of multi-layer beams using taking into account rotational inertial effects. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, vol. 19, no. 8, pp. 2568–2589.
7. Sinichkina A.O., Krylova E.Yu., Micevich S.A., Krysko V.A. Dinamika gibkikh balok pri deystvii udarnykh nagruzok s uchetom belogo shuma [Dynamics of flexible beams under shock loads in

- view of white noise]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2016, vol. 78, no. 3, pp. 280–288.
8. Zhang L. Free vibration of curved thin-walled rectangular beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2015, vol. 168, no. 12, pp. 943–957.
 9. Antonenko E.V., Shulga T.E. Modeli podkrepennogo styka dvukh tonkostennykh tsilindrov raznoy tolshchiny [Models of supported joint of two thin-walled cylinders with different thicknesses]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 303–307.
 10. Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. Nonstationary 3D Motion of an Elastic Spherical Shell. *Mech. Solid*, 2015, vol. 50, no. 2, pp. 208–217.
 11. Hristich D.V. Matematicheskaya model izgiba nelineino uprugih tsilindricheskikh tel [Mathematical model of nonlinear elastic bending of cylindrical bodies]. *Vestnik TulGu. Seriya: Differentsialnye uravneniya i prikladnye zadachi*, 2008, no. 1, pp. 101–105.
 12. Popov O.N., Moiseenko M.O., Treputneva T.A. Vliyaniye simmetrichnykh obshchikh nachalnykh progibov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye i ustoychivost pologikh tsilindricheskikh obolochek [Effect of balanced general initial deflection on stress-strain state and stability of shallow cylindrical shells]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2010, no. 4, pp. 34–39.
 13. Sadeghzadeh H., Ehyaei M.A., Rosen M.A. Techno-economic optimization of a shell and tube heat exchanger by genetic and particle swarm algorithms. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 93, pp. 84–91.
 14. Kantor B.Ya. *Kontaknyye zadachi nelineynoy teorii obolochek vrashcheniya* [Contact problems of the nonlinear theory of revolution shells]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 135 p.
 15. Antufiev B.A., Smiyani A.B. Experimental study of deformation of plates discretely connected to the cylindrical shell. *Russian Aeronautics*, 2012, no. 4, pp. 8–10. In Rus.
 16. Morozov N.F., Tovstik P.E. Bend of a two-layer beam with a rigid contact between layers. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, vol. 75, no. 1, pp. 112–121. In Rus.
 17. Andryushin V.A., Nedbai A.Ya. Vynuzhennyye kolebaniya sloistoy tsilindricheskoy obolochki, soedinennoy tochechnymi uprugimi svyazyami so sloistoy balkoy [Forced oscillations of a layered cylindrical shell connected by point-elastic bonds with a layered beam]. *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 2003, vol. 9, no. 1, pp. 33–41.
 18. Nian F., Liu W. Hybrid synchronization of heterogeneous chaotic systems on dynamic network. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2016, vol. 91, pp. 554–561.
 19. Mahendran G., Chandrasekaran K., Malhotra S.K. Damage Detection in Laminated Composite Beams, Plates and Shells using Dynamic Analysis. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, vol. 787, pp. 350–361.
 20. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Saltykova O.A., Vetsel S.S., Krysko V.A. Nonlinear dynamics and contact interaction of the structures composed of beam-beam and beam-closed cylindrical shell members. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2016, vol. 91, pp. 622–638.
 21. Novozhilov V.V. *Osnovy nelineynoy teorii uprugosti* [Fundamentals of nonlinear elasticity]. Leningrad, Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1948. 213 p.
 22. Anuriev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinistriotel'ya* [Manual for machinist-designer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. Vol. 1. 920 p.
 23. Krysko V.A., Zhigalov M.V., Soldatov V.V., Podturkin M.N. O vybore tipa veivleta pri izuchenii nelineynykh kolebaniy balok s uchetom poperechnykh sdvigoov [On the choice of the type of wavelet in the study of nonlinear oscillations of beams considering transverse shear]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 40, no. 3, pp. 14–22.

Received: 22 September 2016.

Information about the authors

Olga A. Saltykova, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; National Research Tomsk Polytechnic University.

Alena A. Zakharova, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey S. Vetsel, postgraduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Vadim A. Krysko, Dr. Sc., professor, head of the department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

УДК 504.4:546.49:665.65.013 (574.25) (551.578.46)

ОЦЕНКА РТУТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ Г. ПАВЛОДАРА, РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН)

Шахова Татьяна Сергеевна¹,
tatyagns29@yandex.ru

Таловская Анна Валерьевна¹,
talovskaj@yandex.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Филимоненко Екатерина Анатольевна¹,
filimonenkoea@mail.ru

Ляпина Елена Евгеньевна²,
eeldv@mail.ru

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

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность. Ртуть в последнее время привлекает больше внимания исследователей из-за высокой токсичности и биоаккумуляции. Выброс Hg в атмосферу в основном происходит за счет сжигания угля и нефтепродуктов. Уровень ртутного загрязнения за счет поступления твердых выбросов в районах расположения нефтеперерабатывающих и нефтехимических комплексов на данный момент мало изучен, однако эти объекты являются одним из потенциальных источников поступления данного токсичного элемента. Это обуславливает важность проведения данных исследований.

Цель работы: оценить ртутное загрязнение в окрестностях предприятий нефтехимического комплекса в зимний период (на примере г. Павлодара, Республика Казахстан) по данным исследования снежного покрова как накопителя твердых частиц.

Методы исследований: отбор снеговых проб, таяние проб при комнатной температуре, фильтрация с помощью беззольного фильтра типа «синяя лента», высушивание и взвешивание проб, атомно-абсорбционный метод с использованием анализатора ртути РА-915+ и приставкой ПИРО-915 для определения содержания ртути в пробах, для обработки анализа данных использовалась прикладная программа «STATISTICA 8», расчет эко-геохимических показателей: коэффициент концентрации, среднесуточный поток ртути, коэффициент относительного увеличения общей нагрузки элемента, коэффициент аэрозольной аккумуляции.

Результаты. Содержание ртути в твердом осадке снега в окрестностях изучаемых предприятий варьируется в широком диапазоне и превышает фон от 1,5 до 7 раз. Величина среднесуточного выпадения ртути на снежный покров изменяется от 4,9 до 221, мг/(км²·сут); установлен характер распределения ртути в пробах твердого осадка снега, отобранных в окрестности Павлодарского нефтехимического завода. Максимальный показатель выявлен в пробе, отобранной на расстоянии 1,5 км в северо-восточной зоне, превышающий фоновый в 48 раз. Высокое содержание ртути в пробах твердого осадка снега может быть связано со сжиганием газа на факелах предприятий нефтеперерабатывающего комплекса, а также не исключается перенос ртути с выбросами угольной ТЭЦ-3, расположенной на расстоянии 500 м от нефтехимического завода. Возможной формой поступления ртути с выбросами нефтехимического и нефтеперерабатывающего заводов может являться ртуть Hg⁰, адсорбированная на поверхности частиц, поступающих от факельного сжигания газа.

Ключевые слова:

Ртуть, нефтехимический завод, нефтеперерабатывающий завод, снежный покров, фактор обогащения, источники загрязнения атмосферы.

Введение

В настоящее время ртуть и ее соединения являются одним из наиболее опасных веществ в окружающей среде [1]. Ртуть поступает в атмосферу от естественных и антропогенных источников и в последнее время привлекает больше внимания исследователей из-за своей высокой токсичности и биоаккумуляции [2]. Более 95 % ртути присутствует в атмосфере в газообразной форме в виде элементарной ртути Hg⁰. Существует реактивная газообразная форма, состоящая из различных окисленных форм Hg (II). Кроме того, ртуть поступает в ат-

мосферу в виде Hg⁰, адсорбированной на поверхности частиц, а также может содержаться в органических соединениях (метилртуть) [3].

Основными природными источниками ртути являются общая дегазация земной коры и океана, вулканическая деятельность, ртутные месторождения, а также выветривание и эрозия горных пород. Ртуть в природе – рассеянный элемент, концентрирующийся в сульфидных рудах, преимущественно в виде киновари (HgS). Современные антропогенные выбросы ртути в атмосферу соизмеримы с поступлением ртути в окружающую среду

в результате естественных процессов. В связи с тем, что большинство промышленных процессов являются высокотемпературными, выброс ртути в атмосферу происходит в виде газообразных (<1 мкм) или мелкодисперсных (<5 мкм) форм, более крупные металлсодержащие аэрозоли (>10 мкм) частично удаляются золо- и пылеулавливающим оборудованием. При попадании в атмосферу крупные пылевые частицы оседают непосредственно вблизи источника, а мелкие могут распространиться на несколько десятков километров [1].

Во многих работах [4–7] указывается, что сжигание угля является одним из самых значительных антропогенных источников выбросов ртути в атмосферу. Например, исследования в Японии, Китае и Австралии указывают, что большой вклад в поступление ртути вносят угольные электростанции [1, 8–9]. Мировой выброс ртути при сжигании топлива составляет 1,44 тыс. тонн в год [10]. За счет сжигания угля в атмосферу выделяется 3000 тонн ртути в год, тогда как за счет сжигания нефтепродуктов – 1250 тонн в год [1]. Некоторыми исследователями также доказано негативное воздействие ртути на здоровье человека [11, 12]. Например, неорганические соединения ртути быстро накапливаются в почках. Также поступление паров ртути сопровождается приступами бронхита и пневмонии. Отравления ртутью могут привести к поражению центральной нервной системы, нарушению зрения, слуха [10]. За рубежом проводятся многочисленные исследования, направленные на изучение степени влияния ртути на здоровье работников золотодобывающих шахт и на детей, проживающих в районах добычи золота [13–15].

В настоящее время исследователи обращают внимание на выбросы нефтехимических и нефтеперерабатывающих заводов как источников поступления ртути в окружающую среду. Например, в южном Каспии, на Бакинской бухте, являющейся огромным резервуаром отходов переработки нефти, была установлена высокая концентрация ртути в донных отложениях [16]. Работы по оценке поступления ртути в атмосферу с твердыми выбросами нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов содержат недостаточную степень изученности [17]. Например, проведенные исследования твердого осадка снега г. Ангарска отразили высокое содержание ртути в районе расположения АО «Ангарская нефтехимическая компания» [17]. Исследования снежного покрова на территории г. Уфы показали, что крупнейшая промышленная зона в северной части города имеет значительные размеры аномалий по ртути. Авторы связывают это с функционированием крупных нефтехимических и нефтеперерабатывающих и других заводов, расположенных в этой зоне [18]. Аналогичные исследования проводились в г. Томске, где наибольшее содержание ртути в твердом осадке снежного покрова зафиксировано в районе расположения ООО «Томскнефтехим» [19].

Анализ иностранной литературы подтвердил факт недостаточной изученности объектов нефтехимии и нефтепереработки как источников поступления ртути в атмосферный воздух [4–9, 12–15].

Поэтому нами был выбран Павлодарский нефтехимический завод, расположенный в северном промышленном узле города. На территории Павлодарской области в результате деятельности хлор-щелочного производства на бывшем химическом заводе в течение 1975–1994 гг. в окружающую среду поступило около 1310 тонн ртути [20, 21]. Эта ртуть накапливалась под корпусом электролизного производства, загрязняла почву и воздух промышленной площадки, разносилась ветром с мест складирования ртутных отходов и поступала в подземные и поверхностные воды.

В настоящее время и последующие годы важно отслеживать уровень содержания ртути в объектах окружающей среды, в том числе и атмосфере, сложившийся после проведения программы демеркуризации, а также осуществлять мониторинг за уровнем риска, исходящего от остаточного ртутного загрязнения, для здоровья населения, проживающего в северном пригороде Павлодара. Ранее, во время проведения исследований по уровню загрязнения ртутью в северном пригороде города, не учитывали её долю вклада при переработке нефтепродуктов. Потому оценка загрязнения атмосферного воздуха ртутью в окрестностях Павлодарского нефтехимического завода является актуальной проблемой.

Снег считается идеальной матрицей для наблюдения осадений из атмосферы. Атмосферные твердые частицы в снеге разбавлены чистой водой, и не присутствуют частички верхнего слоя земли, за исключением нижних слоев снежного покрова, так что состав атмосферного осадения может быть однозначно измерен, вплоть до очень низких концентраций. Снежинки накапливают больше загрязняющих веществ из атмосферы, чем дождевые капли, из-за большей площади поверхности покрытия и скорости падения [22]. Делая вывод из материалов литературы [23, 24], отметим, что снег является важным элементом при мокром осаждении частиц ртути и ее перемещении из атмосферы на поверхность снежного покрова. Снегопад может собирать ртуть за счет возрастания кристаллов или вымывания, усиливая отложение ртути на территории [25]. Таким образом, снежный покров может выступать в качестве поглотителя ртути и ее временного резервуара [26].

Необходимо оценить уровень накопления ртути в снежном покрове в зоне северного промышленного узла г. Павлодара, на территории которой расположен ряд крупных предприятий различного профиля, выбросы которых загрязняют воздушный бассейн района. Целью нашей работы являлась оценка ртутного загрязнения в окрестностях нефтехимического комплекса в зимний период по данным исследования твердого осадка снежного покрова, обновление данных, характе-

ризующих ртутную нагрузку на исследуемый ландшафт. Для этого были поставлены следующие задачи: выявить степень загрязнения ртутью атмосферного воздуха на территории северного промышленного узла г. Павлодара; определить пункты отбора проб с максимальными показателями содержания ртути и среднесуточного выпадения ртути и установить возможные источники поступления.

Объект и методы исследования

Отбор проб снега проводился в окрестностях нефтехимического завода, ТОО «Компания Нефтехим LTD», АО «Каустик» и ТЭЦ-3, расположенных на территории северного промышленного узла г. Павлодара, в 6 км от города. Павлодарский нефтехимический завод является одним из крупных предприятий в Казахстане по переработке и производству нефтепродуктов. По технологии завод ориентирован на переработку западносибирской нефти. На расстоянии 300 м от нефтехимического завода функционирует ТОО «Компания Нефтехим LTD» – единственное предприятие в Казахстане по производству метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ), который используется в качестве кислородсодержащего высокооктанового компонента при получении автомобильных бензинов, полипропиленов, а также полипропиленовых мешков двух видов. На базе бывшего Павлодарского химического завода, расположенного в 1,5–2 км от указанных предприятий, расположено АО «Каустик» – единственный отечественный производитель хлор-щелочной продукции, работающий на территории Республики Казахстан. В производственном процессе используется технология мембранного электролиза, выпускающей продукцией являются: каустическая сода, жидкий хлор, соляная кислота и гипохлорит натрия. Еще одним крупным предприятием, производящим тепловую и электрическую энергию, в данном промышленном узле является ТЭЦ-3. Основным сырьем, используемым в производстве тепла и энергии, является каменный уголь Экибастузского бассейна.

Для решения поставленной цели в 2015 году был организован отбор проб снежного покрова с территории северного промышленного узла г. Павлодара, включающего вышеперечисленные предприятия. Основное внимание было направлено на нефтехимический завод, поэтому пункты отбора проб выбирали с учетом его расположения, высоты факела, господствующих ветров согласно РД [27]. Выбор пунктов был также обусловлен доступностью расположения промышленных объектов и старых нефункционирующих зданий и удаленностью от дороги (рис. 1). Относительно объекта исследования были выделены северо-восточная и юго-западная зоны.

Для оценки возможного ртутного загрязнения в ближайшем населенном пункте, с. Павлодарское, находящемся на расстоянии 3 км от северо-промышленного узла, были отобраны пять проб

снежного покрова (рис. 1). Фоновым участком был выбран населенный пункт Лебяжье, находящийся на расстоянии 80 км от города в юго-западном направлении, где было отобрано 5 проб снега. Всего было отобрано 17 проб снега.



Рис. 1. Карта пунктов отбора проб снежного покрова в окрестности Павлодарского нефтехимического завода, 2015 г.

Fig. 1. Map of sampling points of snow cover in the vicinity of the Pavlodar petrochemical plant, 2015

Пробы отбирали по методу шурфа на всю мощность снежного покрова, за исключением пятисантиметрового слоя над почвой. Средняя площадь шурфа составляла 42–48 см, а глубина – 45–48 см. Пробы снега были герметично упакованы в полиэтиленовые мешки. Образцы снега были растоплены при комнатной температуре в пластмассовой таре, каждый из которых обеспечивал до 10–12 литров воды. Избыточная чистая вода сливалась, а оставшая часть, около 2–3 литров, с примесями, проходила процесс фильтрации на предварительно взвешенном беззольном фильтре типа «синяя лента». Оставшийся твердый осадок снега высушивался при комнатной температуре. Затем пробы просеивали через сито с размером ячейки 1 мм.

Во время отбора проб и их подготовки к анализу использовали методические рекомендации [28], руководство по контролю загрязнения атмосферы [29], а также учитывали опыт многолетних исследований [30–33], в том числе в пределах Западной Сибири [19, 34–36].

Определение содержания ртути в пробах твердого осадка снега осуществлялось атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915+ с приставкой ПИРО-915- с применением программного обеспечения RA915P. Исследования проводились в лаборатории микроэлементного анализа международного инновационного научного образовательного центра «Урановая геология» на базе кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ. Измерения выполнялись согласно методикам ПНД Ф 16.1:2.23–2000 и М 03–05–2005 [37, 38]. Проба бралась весом от 30 до 50 мг. Перед началом работы на анализаторе выполнялся кон-

троль стабильности градуированного коэффициента. Измерение для каждой пробы проводилось 3 раза, в качестве результирующего значения брались среднеарифметическое.

Для интерпретации и анализа данных проводилась их статистическая обработка с использованием программы STATISTICA 8 и визуализация. Определены статистические характеристики распределения ртути для исследуемого участка: средние значения, стандартное отклонение и стандартная ошибка среднего. Для математических вычислений результатов данных использовалась прикладная программа Microsoft Excel.

Проводился расчет эко-геохимических показателей согласно работам [19, 30, 33–35]. Для выявления аномального уровня содержания ртути был рассчитан коэффициент концентрации (КК):

$$KK = C / C_{\phi},$$

где C – содержание ртути в твердом осадке снега, мг/кг; C_{ϕ} – фоновое содержание, мг/кг.

В целях выявления массы ртути, поступающей на снежный покров из атмосферы ($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$), рассчитывали величину общей нагрузки ($P_{\text{общ}}$), (среднесуточного выпадения ртути на снежный покров):

$$P_{\text{общ}} = C \cdot P_{\text{п}}, \text{ мг} / (\text{км}^2 \cdot \text{сут}),$$

где $P_{\text{п}}$ – пылевая нагрузка, мг/($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$). Расчет пылевой нагрузки показан в работе [19].

Рассчитан коэффициент превышения среднесуточного выпадения ртути на снежный покров над фоновым значением:

$$K_p = P_{\text{общ}} / P_{\phi}, \text{ при } P_{\phi} = C_{\phi} \cdot P_{\text{пф}},$$

где $P_{\text{пф}}$ – фоновая пылевая нагрузка; P_{ϕ} – фоновая нагрузка исследуемого элемента, мг/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$).

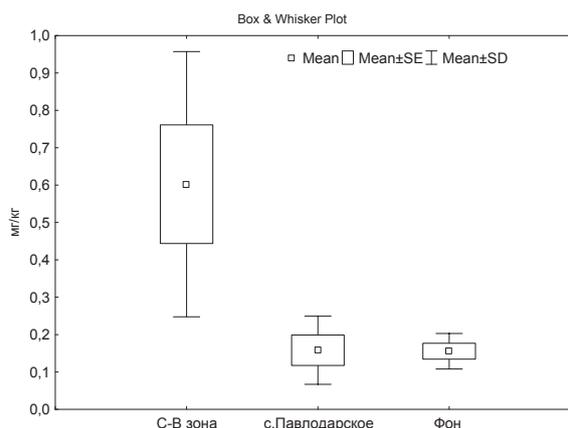
Для оценки степени аккумуляции элементов в аэрозолях применили коэффициент аэрозольной концентрации, предложенный В.В. Добровольским [39]:

$$K_a = C / K_{\kappa},$$

где C – содержание элемента в твердом осадке снега; K_{κ} – кларк элемента верхнего слоя земной коры по [40].

Результаты и их обсуждение

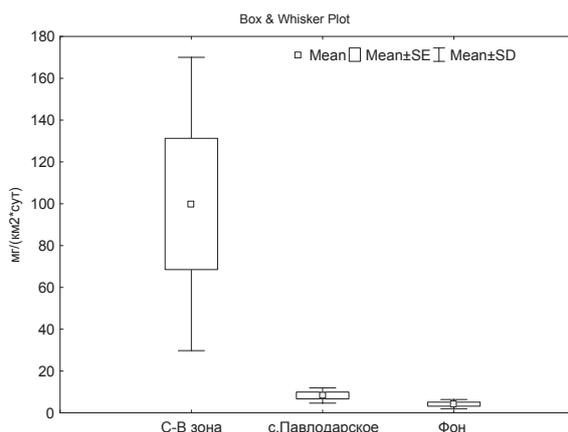
Анализ данных показал, что содержание ртути в твердом осадке снега в окрестностях изучаемых предприятий варьируется в широком диапазоне (рис. 2) и превышает фон от 1,5 до 7 раз (рис. 4). В северо-восточной зоне содержание ртути изменяется от 0,31 до 1,04 мг/кг, в юго-западной составляет 0,22 мг/кг, северо-западной – от 0,03 до 0,26 мг/кг, при фоне 0,15 мг/кг. Максимальное значение приходится на пробы, отобранные на расстоянии 1,5 км – в северо-восточной зоне, где превышение над фоном достигает 7 раз (рис. 4). В пробах с юго-восточной и северо-западной (с. Павлодарское) зон содержание ртути не значительно превышает фон.



Примечание: Mean – среднее значение; Mean±SE – стандартная ошибка; Mean±SD – стандартное отклонение
 Note: Mean is the average value; Mean±SE is the standard error; Mean±SD is the standard deviation

Рис. 2. Диаграммы размаха содержания ртути в твердом осадке снега в окрестностях Павлодарского нефтехимического завода (северо-восточная зона), с. Павлодарское, на фоновом участке, 2015 г.

Fig. 2. Average mercury concentration in snow solid residue in the vicinity of the Pavlodar petrochemical plant in 2015



Примечание: Mean – среднее значение; Mean±SE – стандартная ошибка; Mean±SD – стандартное отклонение
 Note: Mean is the average value; Mean±SE is the standard error; Mean±SD is the standard deviation

Рис. 3. Диаграмма размаха среднесуточного выпадения ртути на снежный покров в окрестностях Павлодарского нефтехимического завода (северо-восточная зона), с. Павлодарское, на фоновом участке, 2015 г.

Fig. 3. Daily average deposition of mercury to snow cover in the vicinity of Pavlodar petrochemical plant, Pavlodarskoe, in 2015

Величина среднесуточного выпадения ртути на снежный покров изменяется от 4,9 до 221 мг/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) (рис. 3), при фоне 4,2 мг/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$) (рис. 5). В северо-восточной зоне среднесуточное выпадение ртути на снежный покров изменяется от 54,04 до 221,98 мг/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$), в юго-западной составляет 14 мг/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$), северо-западной – от 7,15 и до 14,61 мг/($\text{км}^2 \cdot \text{сут}$). Максимальный показатель выявлен в пробе, отобранной на расстоянии 1,5 км – в северо-восточной зоне, превышающий фоновый в

48 раз (рис. 5). Необходимо отметить, что в твердом осадке снега из с. Павлодарское показатель среднесуточного выпадения ртути близок к фоновому. Возможно, это обусловлено направлением преобладающих ветров и переносом незначительной части выбросов от промышленных объектов.

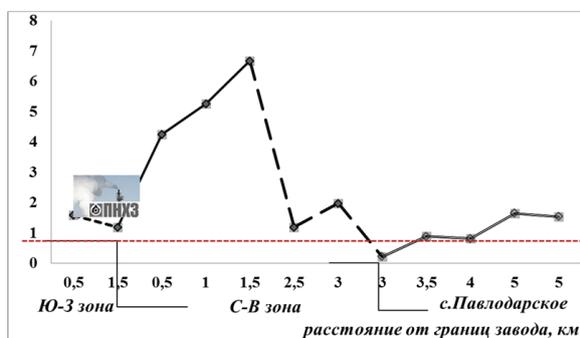


Рис. 4. Коэффициенты концентраций ртути в твердом осадке снега в окрестностях Павлодарского нефтехимического завода и в с. Павлодарское, 2015 г.

Fig. 4. Coefficients of mercury concentration in snow solid residue in the vicinity of the Pavlodar petrochemical plant and in Pavlodarskoe in 2015

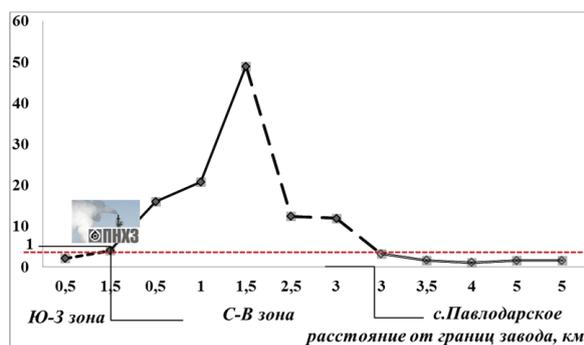


Рис. 5. Коэффициенты превышения выпадений ртути над фоном на снежный покров в окрестностях Павлодарского нефтехимического завода, 2015 г.

Fig. 5. Ratios of mercury deposition excess above the background on the snow cover in the vicinity of the Pavlodar petrochemical plant, 2015

Сравнение концентраций ртути в твердом осадке снега из окрестностей Павлодарского нефтехимического завода и с. Павлодарское с его кларком (рис. 6) позволило выявить степень ее аккумуляции. По В.В. Добровольскому [39], средне концентрирующиеся показатели для ртути отмечены в северо-восточной зоне на расстояниях 0,5, 1 и 1,5 км от границ завода, умеренно концентрирующиеся – в юго-западной зоне, северо-восточной зоне на расстоянии 2,5 и 3 км от границ завода и в с. Павлодарское.

На исследуемой территории техногенными источниками ртути, вероятно, являются следующие объекты. С одной стороны, предприятия нефтехимической и нефтеперерабатывающей отрасли. Согласно работе [41], основным путем поступления атмосферных выбросов ртути в нефтяной и газовой

переработке являются неорганизованные выбросы и газовые факелы при первичных производственных операциях. В работе [42] также подчеркивается, что ртуть в атмосферу поступает от факелов сжигания попутного нефтяного газа. Об этом и свидетельствует аналитический доклад об экономических и экологических издержках сжигания попутного нефтяного газа в России [43]. Учитывая что, ртуть может поступать от сжигания нефтяного газа на факелах, можно предположить, что возможной формой поступления ртути с выбросами нефтехимического и нефтеперерабатывающего заводов может являться ртуть Hg^0 , адсорбированная на поверхности частиц, поступающих от факельного сжигания газа. Необходимо отметить: несмотря на то, что ртуть удаляется из большинства нефтепродуктов и природного газа до сгорания, тем не менее выбросы во время переработки нефти и ее продуктов происходят [6]. Максимальная концентрация ртути в нефтях регионов Западной Сибири составляет $0,07$ г/т, а в смолисто-асфальтеновых компонентах нефти Западной Сибири колеблется от 50 до $145 \cdot 10^{-3}$ г/т [44]. Принимая это во внимание и учитывая величину переработки нефтепродуктов в России и Казахстане, важно понимать, какое количество ртути может поступать в окружающую среду и в каких формах.

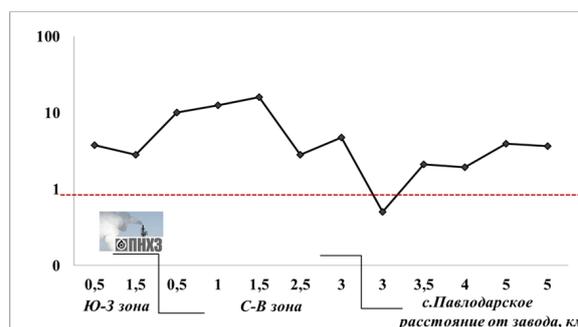


Рис. 6. Коэффициент аэрозольной аккумуляции ртути в твердом осадке снега в окрестностях Павлодарского нефтехимического завода относительно его кларка верхнего слоя земной коры (по Н.А. Григорьеву, 2009 г. [40])

Fig. 6. Coefficient of mercury aerosol accumulation in snow solid residue in the vicinity of the Pavlodar petrochemical plant relative to Clarke of top layer in the Earth crust (by N.A. Grigoriev, 2009 [40])

С другой стороны, ртуть может поступать и с выбросами от сжигания угля на ТЭЦ, использующей экибастузский уголь. Вероятным источником поступления ртути в атмосферу в районе исследования могут являться выбросы от сжигания угля, поскольку на мелкодисперсных частичках может сорбироваться ртуть [2, 3, 8]. По данным [45], ртуть в экибастузских углях содержится в количестве $0,07$ г/т. Именно на расстоянии $1,5$ км в северо-восточном направлении, где выбросы ТЭЦ-3 и нефтехимического завода могут максимально перекрываться, фиксируется максимальное выпадение ртути.

Ранее проведенные экологические работы на территории г. Павлодара также показали повышенное содержание ртути в жидкой фазе снега ($3,3 \text{ мкг/дм}^3$) и в почвах ($3,51 \text{ мг/кг}$) из северной промышленной зоны, где функционирует нефтехимический завод, ТЭЦ-3 и завод по производству полипропилена [46].

Исследования в окрестностях нефтехимического завода г. Томска [19] показали, что в пробах твердого осадка снега в районе его расположения содержание ртути является максимальным по городу и составляет $0,41 \text{ мг/кг}$.

Заключение

Проведенные исследования спустя десятки лет выявили явное загрязнение атмосферного воздуха таким токсичным и опасным элементом, как ртуть в северном промышленном узле г. Павлодара. В северо-восточной зоне отчетливо видны повышенные концентрации ртути по отношению к фоновой, которые могут быть связаны с техногенным загрязнением ртутью и направлением преобладающего ветра. Тогда как в пробах из с. Павлодарское

среднее содержание ртути близко к фоновому, за исключением двух ближних пунктов отбора проб (на расстоянии 5 км от границ завода). Указанное незначительное превышение над фоном, возможно, связано с равнинным характером рельефа и способностью переноса мелких частиц на более дальние расстояния.

Анализ данных позволил установить, что накопление ртути в снеговом покрове и ее концентрирование велики (от $0,03$ до $1,04 \text{ мг/кг}$) в непосредственной близости (от $0,5$ до $2,5 \text{ км}$) от нефтехимического завода.

Следует отметить, что дополнительными источниками выявленных высоких концентраций ртути в пробах твердого осадка снега могут являться выбросы ТЭЦ-3 и нефтехимической компании.

Полученные данные могут быть использованы при планировании мероприятий по экологическому мониторингу атмосферного воздуха в северном промышленном узле г. Павлодара, а также для продолжения дальнейшего мониторинга за уровнем риска для здоровья населения, проживающего в северном пригороде Павлодара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
2. Mercury speciation and emissions from coal combustion in Guiyang, southwest China / T. Shunlin, F. Xinbin, Q. Jianrong, Y. Guoxun, Y. Zaichan // *Environmental Research*. – 2007. – № 105. – P. 175–182.
3. Gratz L.E., Keeler G.J. Sources of mercury in precipitation to Underhill, VT // *Atmospheric Environment*. – 2011. – V. 45. – № 31. – P. 5440–5449.
4. Оценка промышленной эмиссии ртути в Сибири / М.А. Ягольницер, В.М. Соколов, А.Д. Рябцев и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 1995. – № 3. – С. 23–35.
5. Tang S. et al. Actual mercury speciation and mercury discharges from coal-fired power plants in Inner Mongolia, Northern China // *Fuel*. – 2016. – № 1. – P. 194–204.
6. IPIECA (2014). Mercury management in petroleum refining. IPIECA fact sheet, 2014. URL: <http://www.ipieca.org/resources/good-practice/mercury-management-in-petroleum-refining/> (дата обращения 01.09.2016).
7. Расуна Е.Г. et al. Mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe in 2000 and their scenarios until 2020 // *Science of the Total Environment*. – 2006. – № 1. – P. 147–156.
8. Ito S. et al. Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan // *Science of the Total Environment*. – 2006. – № 1. – P. 397–402.
9. Atmospheric mercury emissions in Australia from anthropogenic, natural and recycled sources / P.F. Nelson, A.L. Morrison, H.J. Malfroy, M. Cope, S. Lee, M.L. Hibberd, C.P. (Mick) Meyer, Jh. McGregor // *Atmospheric Environment*. – 2012. – V. 62. – P. 291–302.
10. Справочно-энциклопедическое издание: вредные вещества в окружающей среде. Элементы I–IV групп периодической системы и их неорганические соединения / Л.А. Алимбаева и др. – СПб.: Профессионал, 2005. – 461 с.
11. Дулатова Г.М. Гигиеническая оценка уровней накопления ртути в организме работающих и разработка способа ее выведения: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 1996. – 24 с.
12. Barregard L. et al. Urinary mercury in people living near point sources of mercury emissions // *Science of the total environment*. – 2006. – № 1. – P. 326–334.
13. Ventura D.F. Impact of mercury vapor toxicity on vision and visual structures: Human and experimental studies // *Neurotoxicology and Teratology*. – 2015. – № 49. – P. 114.
14. Bose-O'Reilly S. et al. A preliminary study on health effects in villagers exposed to mercury in a small-scale artisanal gold mining area in Indonesia // *Environmental research*. – 2016. – V. 149. – P. 274–281.
15. Bose-O'Reilly S. et al. Mercury as a serious health hazard for children in gold mining areas // *Environmental research*. – 2008. – № 1. – P. 89–97.
16. Исаев С.А., Султанов Р.Р. Особенности загрязнения тяжелыми металлами вдоль береговых донных отложений к югу от м. Байлово // *Вестник Бакинского государственного университета*. – 2007. – № 4. – С. 153–157.
17. Скворцов В.А., Чуденко К.В. Мониторинг ртути из снежного покрова вблизи предприятий химической промышленности // *Известия Иркутского государственного университета*. – 2010. – № 2. – С. 156–166.
18. Галеева Э.М., Хафизова И.А., Хасанова Э.И. Пространственная структура загрязнения снежного покрова г. Уфы // *Вестник Удмуртского университета*. – 2014. – № 4. – С. 7–11.
19. Ртуть в пылеаэрозолях на территории г. Томска / А.В. Таловская, Е.А. Филимоненко, Н.А. Осипова, Е.Г. Язиков // *Безопасность в техносфере*. – 2012. – № 2. – С. 30–34.
20. Лушин Э.Н., Крахалева Т.Э., Крахалев А.Ф. Отчет о результатах работ по определению загрязнения ртутью промплощадки производства хлора и каустической соды ПХЗ (закл. заключительный). Павлодарская гидрогеологическая экспедиция. – Павлодар: НТЦ «Технолог», 1990. – 194 с.
21. Управление ртутным загрязнением и его мониторинг в городе Павлодаре, Республика Казахстан: Отчет по договору № 134 (УС 37/2003н) от 21.08.2003 г. «Разработка Программы мониторинга ртутного загрязнения Северной промзоны г. Павлодара» / Л.В. Яковлева, М.А. Илющенко, Л.В. Кузьменко, Р.И. Камбаров; Алматинский институт энергетики и связи. – Алматы, 2004. – 52 с. URL: <http://hg-pavlodar.narod.ru/ru/bm/biomercury.htm>.

22. Cereceda-Balic F. et al. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes // Atmospheric environment. – 2012. – V. 47. – P. 51–57.
23. Durnford D.A. et al. How relevant is the deposition of mercury onto snowpacks? P. 1: A statistical study on the impact of environmental factors // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012. – № 19. – P. 9221–9249.
24. Durnford D. et al. How relevant is the deposition of mercury onto snowpacks? P. 2: A modeling study // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012. – № 19. – P. 9251–9274.
25. Maruszczak N. et al. Total mercury and methylmercury in high altitude surface snow from the French Alps // Science of the Total Environment. – 2011. – № 19. – P. 3949–3954.
26. Ferrari C.P. et al. Snow-to-air exchanges of mercury in an Arctic seasonal snow pack in Ny-Ålesund, Svalbard // Atmospheric Environment. – 2005. – № 39. – P. 7633–7645.
27. РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Наблюдения за загрязнением снежного покрова. – М., 1991. – 695 с.
28. Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
29. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
30. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.В. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // Вестник Московского университета. Серия. 5: География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
31. Янченко Н.И., Яскина О.Л. Особенности химического состава снежного покрова и атмосферных осадков в городе Братске // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 27–35.
32. Прожорина Т.И., Якунина Н.И. Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Воронежа по состоянию снежного покрова // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 1 (27). – С. 111–114.
33. Sorokina O.I. et al. Heavy metals in the air and snow cover of Ulan Bator // Geography and Natural Resources. – 2013. – № 3. – P. 291–301.
34. Talovskaya A.V. et al. Element composition of insoluble fraction of aerosols in snow in the vicinity of oil chemistry refinery (Pavlodar City, Kazakhstan) and petrochemical plant (Tomsk City, Russia) // 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – Томск, 2015. – V. 9680. – P. 1–6.
35. Таловская, А.В., Язиков Е.Г., Филимонок Е.А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снежного покрова // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2014. – № 5. – С. 408–417.
36. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia / N.A. Osipova, E.A. Filimonenko, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov // Human and Ecological Risk Assessment. – 2015. – V. 21. – № 6. – P. 1664–1685.
37. ПНД Ф 16.1:2.23–2000 (с изм.) Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв и грунтов на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91С. – СПб., 2005.
38. М 03–05–2005. Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв, грунтов и донных отложений на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91С. – СПб, 2005.
39. Добровольский В.В. География микроэлементов: глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 272 с.
40. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, 2009. – 383 с.
41. Wilhelm S.M. Estimate of Mercury Emissions to the Atmosphere from Petroleum // Environmental Science & Technology. – 2001. – № 24. – P. 4704–4710.
42. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. – 2012. – № 1. – С. 71–81.
43. Попутный нефтяной газ в России: «Сжигать нельзя, перерабатывать!»: аналитический доклад об экономических и экологических издержках сжигания попутного нефтяного газа в России / П.А. Кирюшин, А.Ю. Книжников, К.В. Кочи, Т.А. Пузанова, С.А. Уваров. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013. – 88 с.
44. Калинин Е.П. Геохимическая специализация нефти и ее природа // Вестник Института геологии Коми Научного центра Уральского отделения РАН. – 2009. – № 1. – С. 6–12.
45. Кажумуханова М.З. Элементы-примеси в угольных месторождениях Казахстана // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Междунар. симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 105–106.
46. Ртуть в снеговом покрове и почвах г. Павлодара Республики Казахстан / М.С. Панин, Г.С. Ажаев, Э.А. Гельдымамедова // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: материалы Междунар. симпозиума. – М.: ГЕО-ХИ РАН, 2010. – С. 194–199.

Поступила 02.09.2016 г.

Информация об авторах

Шахова Т.С., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Таловская А.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Филимонок Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ляпина Е.Е., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

UDC 504.4:546.49:665.65.013 (574.25) (551.578.46)

ASSESSMENT OF MERCURY POLLUTION IN THE VICINITY OF PETROCHEMICAL COMPLEX IN WINTER (BY THE EXAMPLE OF PAVLODAR, KAZAKHSTAN)

Tatyana S. Shakhova¹,
tatyagns29@yandex.ru

Anna V. Talovskaya¹,
talovskaj@yandex.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Ekaterina A. Filimonenko¹,
filimonenkoea@mail.ru

Elena E. Lyapina²,
eeldv@mail.ru

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

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance of the research. Hg has gained worldwide attention due to its high toxicity and bio-accumulation. The atmospheric emission of Hg mainly comes from coal combustion and oil products. The level of mercury pollution due to release of solid emissions in the areas of refineries and petrochemical complexes is currently poorly studied, however, these facilities are one of the potential sources of this toxic element. This causes the importance of the research.

The main aim of the study is to assess mercury pollution in the vicinity of the petrochemical complex in winter (by the example of Pavlodar, Kazakhstan), according to the study of snow cover as a storage of solid particles.

The methods used in the study: selection snow samples, melting the samples at room temperature, filtering using the ashless «blue tape» type filter, drying and weighing of samples, atomic absorption method using mercury analyzer RA-915+ and prefix PYRO-915 to determine mercury content in the samples, the program «STATISTICA 8» was applied to process the data analysis, calculation of eco-geochemical parameters: concentration ratio, daily average deposition of mercury, ratio of relative increase of mercury total load, ratio of mercury aerosol accumulation.

The results. The mercury content in snow solid residue in the vicinity of the studied enterprises varies widely, and exceeds the background from 1,5 to 7 times. The value of daily average mercury deposition on snow cover ranges from 4,99 to 221,98; the character of mercury distribution in solid residue samples of snow from the vicinity of the Pavlodar petrochemical plant was determined. The maximum rate was identified in the sample at a distance of 1,5 km in the north-eastern area. It is 48 times above background. High mercury content in solid residue samples of snow can be related to gas flaring at the enterprises of refinery complex. Mercury transfer from the emissions of coal thermal power station, located at a distance of 500 m from the petrochemical plant, is not excluded as well. Hg⁰ mercury, adsorbed on the surface of the particles coming from gas combustion, may be the form of mercury emission from the petrochemical and refinery plants.

Key words:

Mercury, petrochemical plant, petroleum refinery, snow cover, enrichment factors, air pollution sources.

REFERENCES

1. Yanin E.P. *Rtut v okruzhayushchey srede promyshlennogo goroda* [Mercury in the environment of the industrial city]. Moscow, IMGRE Publ., 1992. 169 p.
2. Shunlin T., Xinbin F., Jianrong Q., Guoxun Y., Zaichan Y. Mercury speciation and emissions from coal combustion in Guiyang, southwest China. *Journal of Environmental Research*, 2007, no. 105, pp. 175–182.
3. Gratz L.E., Keeler G.J. Sources of mercury in precipitation to Underhill, VT. *Atmospheric Environment*, 2011, vol. 105, no. 31, pp. 5440–5449.
4. Yagolnitsker M.A., Sokolov V.M., Ryabtsev A.D. Otsenka promyshlennoy emissii rtuti v Sibiri [Assessment of mercury industrial emissions in Siberia]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 1995, no. 3. pp. 23–35.
5. Tang S. Actual mercury speciation and mercury discharges from coal-fired power plants in Inner Mongolia, Northern China. *Fuel*, 2016, no. 1, pp. 194–204.
6. IPIECA (2014). *Mercury management in petroleum refining. IPIECA fact sheet*, 2014. Available at: <http://www.ipieca.org/resources/good-practice/mercury-management-in-petroleum-refining/> (accessed 1 September 2016).
7. Pacyna E.G. Mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe in 2000 and their scenarios until 2020. *Science of the Total Environment*, 2006, no. 1, pp. 147–156.
8. Ito S. Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan. *Science of the Total Environment*, 2006, no. 1, pp. 397–402.
9. Nelson P.F., Morrison A.L., Malfroy H.J., Cope M., Lee S., Hibberd M.L., Meyer C.P. (Mick), McGregor Jh. Atmospheric mercury emissions in Australia from anthropogenic, natural and recy-

- cled sources. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 62, pp. 291–302.
10. *Spravochno-enzhiklopedicheskoe izdanie: vrednye veshchestva v okruzhayushchey srede. Elementy I-IV grupp periodicheskoy sistemy i ikh neorganicheskie soedineniya*. pod red. V. A. Filova [i dr.] [Reference encyclopaedic edition: noxious substances in the environment. Elements of Groups I-IV of the periodic system and their inorganic compounds]. St. Peterburg, Professional Publ., 2005. 461 p.
 11. Dulatova G.M. *Gigienicheskaya otsenka urovney nakopleniya rtuti v organizme rabotayushchikh i razrabotka sposoba ee vyvedeniya*. Avtoreferat Dis. kand. nauk [Hygienic assessment of the levels of mercury accumulation in the body of workers and development of the method for its removal. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1996. 24 p.
 12. Barregard L. Urinary mercury in people living near point sources of mercury emissions. *Science of the total environment*, 2006, no. 1, pp. 326–334.
 13. Ventura D.F. Impact of mercury vapor toxicity on vision and visual structures: Human and experimental studies. *Neurotoxicology and Teratology*, 2015, no. 49, pp. 114.
 14. Bose-O'Reilly S. A preliminary study on health effects in villagers exposed to mercury in a small-scale artisanal gold mining area in Indonesia. *Environmental research*, 2016, vol. 149, pp. 274–281.
 15. Bose-O'Reilly S. Mercury as a serious health hazard for children in gold mining areas. *Environmental research*, 2008, no. 1, pp. 89–97.
 16. Isayev S.A., Sultanov R.R. Features of heavy metal pollution along the coastal sediments south to the m. Bail. *Vestnik Bakinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2007, no. 4, pp. 153–157. In Rus.
 17. Skvortsov V.A., Chudenko K.V. Mercury monitoring in snow cover near the chemical industry. *Bulletin of Irkutsk State University*, 2010, vol. 3, no 2, pp. 156–166. In Rus.
 18. Galeyeva E.M., Khafizova I.A., Khasanova E.I. Spatial structure of snow cover pollution in Ufa. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2014, no. 4, pp. 7–11. In Rus.
 19. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Osipova N.A., Yazikov E.G. Mercury in the dust aerosols in the territory of Tomsk. *Safety in Technosphere*, 2012, no 2, pp. 30–34. In Rus.
 20. Lushin E.N., Krakhaleva T.E., Krakhalev A.F. *Otchet o rezultakh rabot po opredeleniyu zagryazneniya rtutyu prompleshchadki proizvodstva khloro i kausticheskoy sody PKHZ (zaklyuchitelny)* [Report on the results of work on defining mercury contamination of industrial sites of chlorine and caustic soda PCP (final production)]. Pavlodar, Tekhnolog Publ., 1990. 194 p.
 21. Yakovleva L.V., Ilyushchenko M.A., Kuzmenko L.V., Kambelev R.I. Upravleniye rtutnym zagryazneniyem i ego monitoring v gorode Pavlodare, Respublika Kazakhstan [Mercury pollution management and monitoring in Pavlodar, Kazakhstan]. *Otchet po dogovoru № 134 (US 37/2003n) ot 21.08.2003 g. «Razrabotka Programmy monitoringa rtutnogo zagryazneniya Severnoy promzony g. Pavlodara»* [Report on Contract no. 134 (FF 37/2003n) from 21.08.2003, the «Development of the Program for Monitoring Mercury Pollution in Northern industrial area, Pavlodar»]. Almaty, 2004. 52 p. Available at: <http://hg-pavlodar.narod.ru/ru/bm/biomercury.htm> (accessed 28 August 2016).
 22. Cereceda-Balic F. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmospheric environment*, 2012, vol. 47, pp. 51–57.
 23. Durnford D.A. How relevant is the deposition of mercury onto snowpacks? P. 1: A statistical study on the impact of environmental factors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, no. 19, pp. 9221–9249.
 24. Durnford D. How relevant is the deposition of mercury onto snowpacks? P. 2: A modeling study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, no. 19, pp. 9251–9274.
 25. Maruszczak N. Total mercury and methylmercury in high altitude surface snow from the French Alps. *Science of the Total Environment*, 2011, no. 19, pp. 3949–3954.
 26. Ferrari C.P. Snow-to-air exchanges of mercury in an Arctic seasonal snow pack in Ny-Ålesund, Svalbard. *Atmospheric Environment*, 2005, no. 39, pp. 7633–7645.
 27. RD 52.04.186–89. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery. Nablyudeniya za zagryazneniyem snezhnogo pokrova* [Guidance on control of air pollution. Observations of snow cover pollution]. Moscow, 1991. 695 p.
 28. Saet Y.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
 29. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimeskoy otsenke zagryazneniya territoriy gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for evaluation of geochemical pollution of the cities with chemical elements]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 111 p.
 30. Kasimov N.S., Kosheleva N.V., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover in the Eastern District of Moscow. *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Seriya Geografiya*, 2012, no. 4, pp. 14–24. In Rus.
 31. Yanchenko N.I., Yaskina O.L. Features of chemical composition of snow cover and precipitation in Bratsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 27–35. In Rus.
 32. Prozhorina T.I., Yakunina N.I. Assessment of air pollution in Voronezh based on snow cover. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2014, no. 1 (27), pp. 111–114. In Rus.
 33. Sorokina O.I. Heavy metals in the air and snow cover of Ulan-Bator. *Geography and Natural Resources*, 2013, no. 3, pp. 291–301.
 34. Talovskaya A.V. Element composition of insoluble fraction of aerosols in snow in the vicinity of oil chemistry refinery (Pavlodar City, Kazakhstan) and petrochemical plant (Tomsk City, Russia). *21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Tomsk, 2015. Vol. 9680, pp. 1–6.
 35. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. Assessment of air pollution in urban areas of Tomsk region according to the study of snow cover. *Geokologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2014, no. 5, pp. 408–417. In Rus.
 36. Osipova N.A., Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, vol. 21, no. 6, pp. 1664–1685.
 37. PND F 16.1:2.23–2000 (s izm.). *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli obshchey rtuti v probakh pochv i gruntov na analizatore rtuti RA-915+ s pristavkoy RP-91S* [Methods of measurement of total mercury mass fraction in soil samples and soil with mercury analyzer RA-915 + with the prefix RP-91c]. St-Petersburg, 2005.
 38. M 03–05–2005. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli obshchey rtuti v probakh pochv, gruntov i donnykh otlozheniy na analizatore rtuti RA-915+ s pristavkoy RP-91S* [Methods of measurement of total mercury mass fraction in soil samples, soil and sediment on mercury analyzer RA-915 + with the prefix RP-91c]. St-Petersburg, 2005.
 39. Dobrovolskiy V.V. *Geografiya mikroelementov: globalnoye rasseyaniye* [Geography of trace elements: global dissipation]. Moscow, Mysl Publ., 1983. 272 p.
 40. Grigoryev N.A. *Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. Yekaterinburg, Institut geologii i geokhimii Uralskogo otdeleniya RAN, 2009. 383 p.

41. Wilhelm S.M. Estimate of Mercury Emissions to the Atmosphere from Petroleum. *Environmental Science & Technology*, 2001, no. 24, pp. 4704–4710.
42. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava snegovykh vod na territorii Khanty-Mansiyskogo Avtonomnogo Okruga [Features of formation of snow water chemical composition in Khanty-Mansi Autonomous Okrug]. *Kriosfera Zemli*, 2012, no. 1, pp. 71–81. In Rus.
43. Kiryushin P.A., Knizhnikov A.Yu., Kochi K.V., Puzanova T.A., Uvarov S.A. Poputny neftyanoy gaz v Rossii: «Szhigat nelzya, pererabatyvat!» [Associated petroleum gas in Russia: « Burning is not allowed, recycle! »]. *Analiticheskiy doklad ob ekonomicheskikh i ekologicheskikh izderzhkakh szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii* [Analytical report on economic and ecological costs]. Moscow, WWF Publ., 2013. 88 p.
44. Kalinin E.P. Geokhimicheskaya spetsializatsiya nefti i ee priroda [Geochemical specialization of oil and its nature]. *Vestnik instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniya RAN*, 2009, no. 1, pp. 6–12.
45. Kazhumukhanova M.Z. Elementy-primesi v ugolnykh mestorozhdeniyakh Kazakhstana [Trace elements in coal deposits of Kazakhstan]. *Trudy XIX^{ta} Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni ak. M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh: Problemy geologii i osvoeniya nedr* [Proc. XIXth ac. M.A. Usov Intern. Symp. for students and young scientists: Problems of Geology and Mineral Resources Development]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. Pp. 105–106.
46. Panin M.S., Azhaev G.S., Geldymamedova E.A. Rtut v snegovom pokrove i pochvakh g. Pavlodara Respubliki Kazakhstan [Mercury in snow cover and soils in Pavlodar, Republic of Kazakhstan]. *Materialy Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Rtut v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty* [Proc. Intern. Symp. Mercury in biosphere: ecological-geochemical aspects]. Moscow, 2010. pp. 194–199.

Received: 2 September 2016.

Information about the authors

Tatyana S. Shakhova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anna V. Talovskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Filimonenko, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena E. Lyapina, Cand. Sc., researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 62–83–523:550.832:621.876

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАРОТАЖНЫХ ПОДЪЕМНИКОВ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКВАЖИН

Чернышева Татьяна Александровна¹,
cherta@tpu.ru

Журиков Сергей Александрович²,
GurikovSA @asu-expert.ru

Чернышев Александр Юрьевич¹,
ach@tpu.ru

Чернышев Игорь Александрович¹,
chia@tpu.ru

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

² ООО «АСУ-ЭКСПЕРТ»,
Россия, 634029, г. Томск, ул. Красноармейская, 51/1.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания скалярных асинхронных электроприводов каротажных подъемников комплексов визуального контроля технического состояния скважин.

Цель работы: исследование скалярных систем преобразователь частоты – асинхронный двигатель, учитывающих особенности эксплуатации и изменения параметров нагрузки подъемников комплексов геофизического исследования скважин.

Методы исследований основаны на использовании теории автоматического управления и имитационного моделирования в программной среде MatLab–Simulink.

Результаты. Разработана методика расчета нагрузки при спуске и подъеме скважинного прибора, что позволяет более точно определять мощность электропривода подъемника. Разработаны и исследованы асинхронные электроприводы геофизических подъемников со скалярным регулированием скорости. Рассчитаны переходные процессы во всех стандартных режимах работы электропривода каротажного подъемника, а также при захвате геофизического прибора в скважине. Полученные теоретические исследования подтверждены экспериментально при создании электроприводов подъемников установок геофизического исследования скважин.

Выводы. При исследовании скалярных асинхронных электроприводов с частотным регулированием скорости следует учитывать особенности широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователя частоты, что позволяет получить более достоверные результаты имитационного моделирования и ускорить процесс настройки электроприводов каротажных подъемников. Установлено, что задержанная отрицательная обратная связь по току в каналах регулирования напряжения и частоты ограничивает действующее значение тока статора асинхронного двигателя с частотным регулированием его скорости во всех штатных и аварийных режимах работы каротажного подъемника. Установлено, что во всех режимах работы электропривода каротажного подъемника нагрузка на валу двигателя активная и, следовательно, при спуске скважинного прибора асинхронный двигатель работает в генераторном режиме с отдачей энергии в тормозные резисторы преобразователя частоты. При длительном спуске скважинного прибора полученные результаты следует учитывать, выбирая тормозные резисторы электропривода повышенной мощности.

Ключевые слова:

Геофизическое исследование скважин, статические нагрузки скважинного прибора, динамические нагрузки скважинного прибора, асинхронный электропривод, скалярное управление, широтно-импульсная модуляция.

Введение

В процессе эксплуатации скважины, а она может находиться в рабочем состоянии десятки лет, её обсадная колонна подвергается различным воздействиям, как механическим, так и действию агрессивного состава скважинной жидкости, которая в глубоких скважинах может находиться под высоким давлением и температурой.

Геофизические исследования в скважинах проводятся с помощью специальных установок, которые включают наземный регистратор и скважинный прибор, соединенные между собой каналом связи – геофизическим кабелем.

Спуск и подъем скважинных приборов осуществляются с помощью подъемника, кабеля, под-

весного и направляющего роликов, устанавливаемых на устье скважины. В зависимости от типа и длины кабеля применяют с лебедками разных размеров и конструкций.

Контролируют техническое состояние скважин методами сканирования, наиболее распространенными из которых являются: ядерно-физические [1–4], электрические и электромагнитные [5], акустические [6–8], магнитометрические [9] методы. Во всех случаях в скважину опускают зонд или скважинный прибор и с его помощью контролируют физические величины и состояние скважины.

Появление мощных светодиодов оптического спектра позволило создать приборы с новыми методами каротажа – с визуальным контролем техниче-



Рис. 1. Измерительный комплекс визуального контроля состояния скважин: 1 – скважинный прибор, 2 – наземный регистратор, 3 – плоские пружины

Fig. 1. Measuring system of visual monitoring of the boreholes: 1 – down hole instrument, 2 – ground-based registrar, 3 – flat springs

ского состояния скважин. Визуальный каротаж применяется в тех случаях, когда скважинная жидкость прозрачная. (Доведение скважинной жидкости до прозрачного состояния возможно путем промыванием скважины.) Для данного метода каротажа научно-производственным объединением «АСУ-ЭКСПЕРТ» разработан и успешно применяется измерительный комплекс КП-511ВК (рис. 1).

Со скважинного прибора 1 в наземный регистратор 2 передается видеосигнал цветного или черно-белого изображения, в зависимости от применяемой видеокамеры. Фиксируют движение скважинного прибора в колонне или скважине плоские пружины 3.

Прибор обеспечивает видеосъемку заданного интервала видеокамерой с разрешающей способностью 550 TV и чувствительностью 0,05 лк. Скважинный прибор и наземный регистратор рассчитан на применение стандартного трехжильного геофизического кабеля длиной до 500 м. Сила света системы освещения не менее 180 кД, степень освещенности объекта регулируется посредством изменения тока светодиодов. С наземного регистратора могут быть заданы уровень освещения, степень сжатия видеосигнала и частота передачи данных.

Перечень дефектов, обнаруживаемых видеосъемкой в процессе сдачи и эксплуатации скважины:

- смятие труб, повреждения в колонне;
- наличие посторонних предметов в скважине;
- обрушение породы в скважине;
- отсутствие сальника между эксплуатационной и фильтровой колоннами;
- деформация надфильтровой трубы;
- наличие песчаной пробки и зернистость материала;
- наличие недоворота муфтовых соединений;
- качество сварных швов и т. д.

Кадры с изображением участков исследованных скважин приведены на рис. 2 и 3.

На фотографии (рис. 2), сделанной с помощью измерительного комплекса КП-511ВК визуального контроля технического состояния скважин об-

наружен посторонний гибкий кабель или трос. Посторонний предмет попал в скважину совсем не случайно. Очевидно, что его наличие не улучшает качество воды при ее заборе из скважины. После исследования скважины трос был удален.

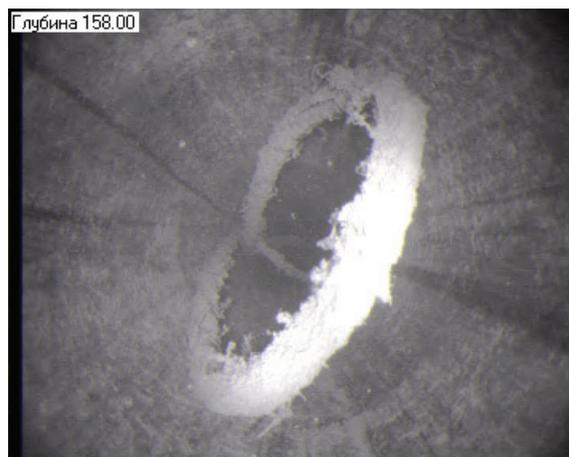


Рис. 2. Гибкий кабель в скважине

Fig. 2. Flexible cable in the borehole



Рис. 3. Обрушение породы. Каверна

Fig. 3. Vug hole. Cavern

На другой фотографии (рис. 3) отчетливо прослеживается обрушение породы в скважине без обсадной колонны. Возможно тампонирующее обрушение породой водоносного слоя и добыча воды с верхних слоев.

Приведенные фотографии свидетельствуют о необходимости периодического контроля технического состояния скважин и необсадных колонн методами визуального контроля.

Расчет нагрузки при подъеме и спуске скважинного прибора

Чтобы правильно выбрать двигатель каротажного подъемника, необходимо определить момент сопротивления при подъеме и спуске геофизического прибора. Значение общего момента сопротивления при движении геофизического прибора в скважине складывается из статического момента $M_c(N)$ и динамического момента $M_d(v)$, приведенных к валу двигателя:

$$M_c = M_c(N) + M_d(v). \quad (1)$$

В отличие от большинства методов геофизического исследования скважин [1–9], осуществляющих контроль при подъеме геофизического прибора, метод визуального контроля состояния скважин предполагает их осмотр при спуске геофизического прибора, так как в этом случае скважина еще не замутнена различными находящимися в ней отложениями. При спуске геофизического прибора на валу двигателя действует статическая активная нагрузка, определяемая выражением

$$M_{cc}(N) = \frac{F_T(N) \cdot d_{к.б}(N) \cdot \eta_n}{2 \cdot i_n} - \frac{M_0}{i_n \cdot \eta_n}, \quad (2)$$

где i_n – общее передаточное число трансмиссии от вала электродвигателя к барабану намотки каротажного грузонесущего кабеля; η_n – к. п. д. кинематической цепи, учитывающий потери в редукторе, цепной передаче, подшипниках качения и трение в блоках и каротажном кабеле при спуске прибора; $F_T(N)$ – сила тяги, создаваемая барабаном для скважинного прибора, находящегося в скважине, заполненной прозрачной жидкостью [10]; $d_{к.б}(N)$ – диаметр намотки кабеля на барабан; N – номер слоя намотки геофизического кабеля на барабане, начиная с пустого барабана; M_0 – момент, учитывающий трение плоских пружин геофизического прибора о стенки скважины.

Скважинный прибор (рис. 1) при его подъеме или спуске имеет ось симметрии, которая при его движении совпадает с вектором скорости, в этом случае на скважинный прибор действует сила лобового динамического сопротивления:

$$F_d(v) = c_1 \frac{\rho \cdot v^2}{2} S, \quad (3)$$

где ρ – плотность прозрачной скважинной жидкости, кг/м³; v – скорость движения скважинного прибора, м/с; S – наибольшее поперечное сечение скважинного прибора, м²; c_1 – безразмерный коэф-

фициент сопротивления, определяемый экспериментально.

Анализ уравнения (3) показывает, что сила динамического сопротивления всегда реактивная, всегда препятствует движению и действует на скважинный прибор только во время его движения. При скорости прибора, равной нулю, сила динамического сопротивления также будет равна нулю. Следует отметить, что теоретически между силой лобового динамического сопротивления (3) и линейной скоростью скважинного прибора v существует квадратичная зависимость. Практически показатель степени у скорости v может меняться от 2,5 до 6 [11], и это – парадоксы гидродинамики [12].

Результирующий момент сопротивления при спуске геофизического прибора в скважину

$$M_{cc}(N, v) = \frac{F_T(N) d_{к.б}(N)}{2 i_n \eta_n} - \frac{M_0}{i_n \eta_n} - \frac{c_1 \rho v^2 S d_{к.б}(N)}{2 i_n \eta_n}. \quad (4)$$

Составляющая $M_0/i_n \eta_n$ момента $M_{cc}(N, v)$ при спуске геофизического прибора невелика и возникает только из необходимости центровки скважинного прибора в скважине. Составляющая динамического момента проявляется только при большой скорости спуска геофизического прибора, близкой к скорости его падения в жидкости. При реальной скорости спуска от $v_{\min}=0,014$ м/с до $v_{\max}=0,05$ м/с значения динамического момента невелики.

Таким образом, статический момент при спуске скважинного прибора – активный момент, и задача электропривода – обеспечить плавный спуск прибора без свободного его падения в скважинной жидкости.

После опускания скважинного прибора до необходимой глубины и завершения визуального контроля неизменно следует подъем прибора. При подъеме скважинного прибора приведенный к валу двигателя момент записывается в виде

$$M_{cn}(N, v) = \frac{F_0(N) d_{к.б}(N)}{2 i_n \eta_n} + \frac{M_0}{i_n \eta_n} + \frac{c_1 \rho v^2 S d_{к.б}(N)}{i_n \eta_n}. \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что статический момент сопротивления при спуске $M_{cc}(N)$ несколько меньше, чем при подъеме $M_{cn}(N)$ скважинного прибора, поэтому расчет мощности двигателя каротажного подъемника следует вести для режима подъема прибора.

Особенности изменения момента сопротивления при подъеме скважинного прибора от числа слоев N и скорости его движения необходимо учитывать при выборе мощности приводного двигателя и моделировании работы электропривода подъемника.

Моделирование электропривода каротажного подъемника

Каротажный подъемник для визуального контроля состояния скважин рассчитан для работы в скважинах с относительно небольшой глубиной – 100–200 м. Для такого подъемника число слоев N

каротажного грузонесущего кабеля на барабане обычно не превышает 10. В этом случае для обеспечения постоянной скорости спуска и подъема скважинного прибора диапазон регулирования электропривода обычно не превышает 10–15 о.е.

Поэтому для механизма подъема скважинного прибора, работающего с небольшим диапазоном регулирования скорости и не требующего высокого качества переходных процессов, наиболее целесообразно применять асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, получающие питание от преобразователя частоты со скалярной системой управления [13–15]. Необходимый диапазон регулирования скорости достигается в скалярных электроприводах введением дополнительной положительной обратной связи по току в каналах регулирования напряжения и частоты [16–18]. При глубинах исследуемых скважин более 500 м для каротажных подъемников необходимо применять асинхронный электропривод с частотным регулированием скорости и векторной системой управления [10, 19–21].

В случае застревания скважинного прибора в колонне или скважине, для исключения возможности обрыва грузонесущего кабеля, при превышении момента на валу двигателя допустимого значения электропривод должен автоматически остановиться. Для ограничения тока статора асинхронного двигателя, а, следовательно, и его момента, в скалярных электроприводах применяется задержанная отрицательная обратная связь по току в каналах регулирования напряжения и частоты. Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением, обеспечивающая отмеченные необходимые требования, приведена на рис. 4.

Основными элементами регулируемого асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением, являются (рис. 4): *М* – асинхронный двигатель; *ПЧ* – преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения (АИН); *ПКП* – преобразователь координат прямой; *ПКО* – преобразователь координат обратный, осуществляющий расчет фактического значения действующего фазного тока двигателя; *ПЧН* – преобразователь «частота – напряжение», формирующий характеристику класса $U/f = \text{const}$, определяемую нагрузкой электропривода; *ЗИ* – задатчик интенсивности скорости с *S*-образной характеристикой; *ДТ* – датчики тока трех фаз двигателя; *КС* – блок компенсации скольжения, обеспечивающий положительную обратную связь по току в канале регулирования частоты; *КМ* – блок компенсации момента, обеспечивающий положительную обратную связь по току в канале регулирования напряжения; *РОТ* – пропорционально-интегральный регулятор ограничения тока асинхронного двигателя; *Б* – барабан; *СП* – скважинный прибор; *МР* – мерный ролик; *ИДП* – импульсный датчик, позволяющий определить положение скважинного прибора в скважине; $f_{1\text{зад}}$ – сигнал задания частоты на выходе инвертора напряжения; $I_{1\text{max}}$ – сигнал задания на ограничение максимального тока асинхронного двигателя.

Исследование асинхронного электропривода с частотным регулированием скорости в динамике, при спуске и подъеме скважинного прибора, проведено в программной среде *MatLab-Simulink*. Программа моделирования учитывает наличие третьей гармоники в кривой напряжений управления U_{yA} , U_{yB} , U_{yC} , широтно-импульсное регулирование напряжения инвертора.

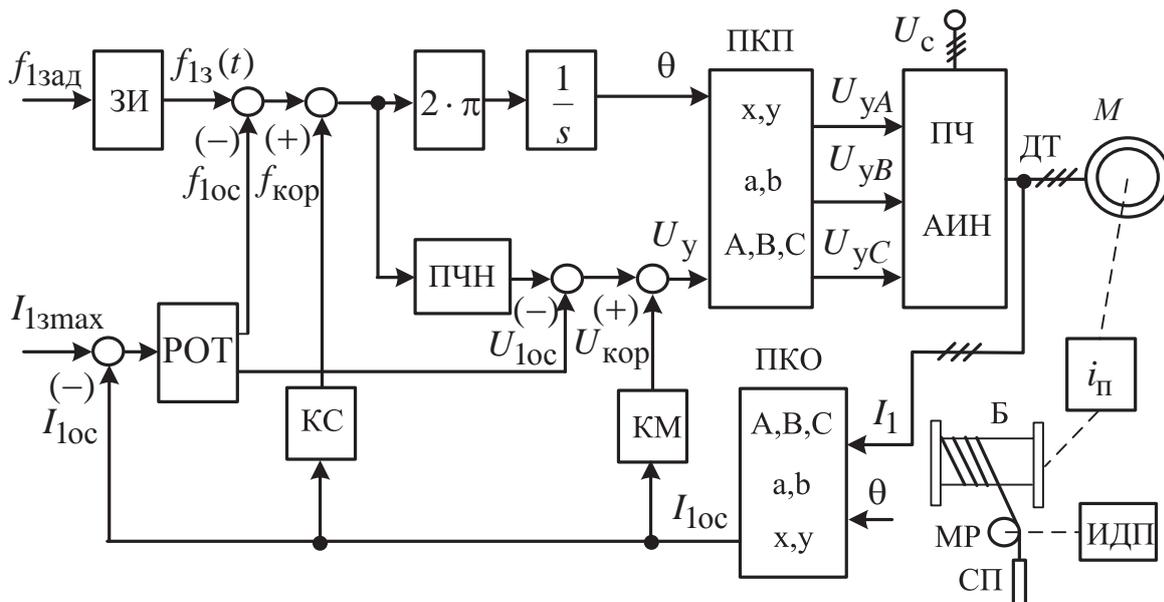


Рис. 4. Функциональная схема скалярного электропривода каротажного подъемника

Fig. 4. Functional diagram of the electric drive with scalar control system of well logging truck hoist

Моделирование процессов в электроприводе каротажного подъемника произведено для асинхронного двигателя серии RA132MB6, имеющего следующие каталожные данные: номинальная мощность $P_n=5,5$ кВт; номинальное фазное напряжение $U_{1n}=220$ В; номинальная синхронная скорость $\omega_{0n}=104,7$ рад/с, номинальная скорость $\omega_n=99,48$ рад/с, номинальный к. п. д. $\eta_n=0,84$ о. е.; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_n=0,82$ о. е.; к. п. д. при частичной нагрузке (75%-я нагрузка) $\eta_{0,75}=0,85$ о. е., коэффициент мощности при частичной нагрузке (75%-я нагрузка) $\cos\varphi_{0,75}=0,74$ о. е.; кратность пускового тока $k_i=I_n/I_n=5,5$ о. е.; кратность максимального момента $k_{max}=M_n/M_n=2,5$ о. е. Эти данные позволяют рассчитать по методике [22] параметры Т-образной схемы замещения двигателя.

Графики переходных процессов скорости двигателя $\omega(t)$, электромагнитного момента $M(t)$ и действующего значения тока статора $I_1(t)$ для рабочего режима спуска скважинного прибора каротажным подъемником со скалярным электроприводом «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» приведены на рис. 5. Задания на пуск электропривода и на изменение скорости формируются задатчиком интенсивности с S-образной характеристикой.

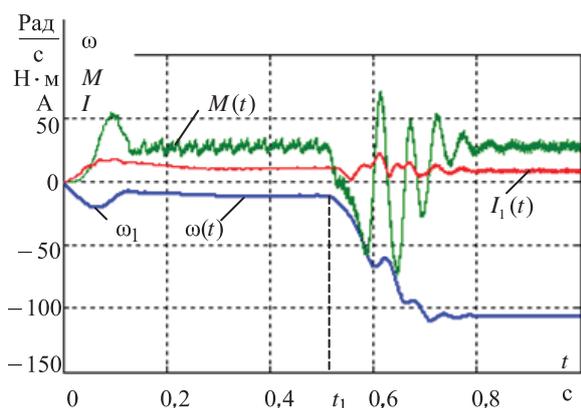


Рис. 5. Графики переходных процессов скорости двигателя $\omega(t)$, электромагнитного момента $M(t)$ и действующего значения тока статора $I_1(t)$ при спуске скважинного прибора

Fig. 5. Plots of transients of motor speed $\omega(t)$, electromagnetic torque $M(t)$ and the effective value of the stator current $I_1(t)$ when lowering the down hole instrument

Анализ переходных процессов (рис. 5) показывает, что на начальном участке спуска геофизического прибора в скважину с малой скоростью ($t=0$) активная нагрузка (2) заставляет электропривод раскручиваться до скорости ω_1 , превышающей установленную. Нарастающий момент $M(t)$ двигателя не позволяет скважинному прибору свободно падать в скважину и в дальнейшем обеспечивает его вход в устье скважины с заданной малой скоростью. В момент времени t_1 скорость спуска геофизического прибора увеличивается до рабочей, определяемой оператором (в данном случае до максимальной рабочей скорости), и спуск скважинно-

го прибора происходит при номинальной частоте двигателя $f_{1n}=50$ Гц со скоростью $\omega=106,4$ рад/с – большей номинальной синхронной скорости $\omega_{0n}=104,7$ рад/с. Асинхронный двигатель работает с активной нагрузкой в генераторном режиме с отдачей потенциальной энергии в тормозной резистор асинхронного частотно-регулируемого электропривода.

Колебания электромагнитного момента $M(t)$ и действующего тока статора $I_1(t)$ асинхронного двигателя являются особенностями скалярного управления. Действующие значения тока статора двигателя I_1 в переходных режимах не превышают заданного, в данном случае двукратного номинального значения $I_{1max}=2 \cdot I_{1n}=24$ А, не превышает двукратного номинального значения и электромагнитный момент асинхронного двигателя.

Процессы в переходных режимах электропривода и его работе с заданной установившейся скоростью полностью удовлетворяют технологическому процессу каротажа с визуальным контролем состояния скважины.

При необходимости провал скорости при пуске электропривода можно избежать, если электромагнитный растормаживатель барабана Б (рис. 4) включать с задержкой после подачи сигнала на вращение электропривода. Однако это требует совместной настройки электропривода и автоматики каротажного подъемника.

Подъем скважинного прибора также осуществляется при активной нагрузке. Графики переходных процессов скорости двигателя $\omega(t)$, электромагнитного момента $M(t)$ и действующего значения тока статора $I_1(t)$ для режима подъема скважинного прибора каротажным подъемником приведены на рис. 6.

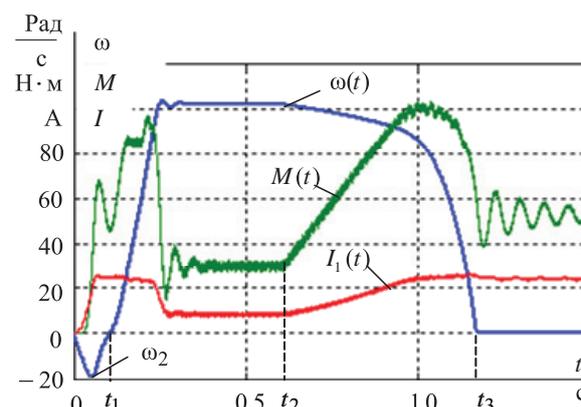


Рис. 6. Графики переходных процессов скорости двигателя $\omega(t)$, электромагнитного момента $M(t)$ и действующего значения тока статора $I_1(t)$ при подъеме скважинного прибора и его заклинивании

Fig. 6. Plots of transients of motor speed $\omega(t)$, electromagnetic torque $M(t)$ and the effective value of the stator current $I_1(t)$ when hoisting the downhole instrument and jamming

Действие активного момента сопротивления, приведенного к валу двигателя при подъеме, про-

является в провале скорости асинхронного двигателя до значения $\omega_2 = -19,5$ рад/с. При необходимости провал скорости можно исключить, растормаживая вал барабана в момент времени t_1 после подачи задающего воздействия на электропривод. Во время переходных режимов момент асинхронного двигателя значительно колеблется. Это особенность скалярного управления, так как пуск двигателя происходит при несформированномся потоке и в двигателе отсутствует круговое вращающееся электромагнитное поле.

На рис. 6 рассмотрен также режим прихвата скважинного прибора в скважине. Такой режим может возникнуть, например, в необсаженных колоннах вследствие обрушения породы (рис. 3) при подъеме прибора. В этом случае подъем скважинного прибора необходимо автоматически остановить. На рис. 6 в момент времени t_2 произошло заклинивание скважинного прибора (прихват), момент асинхронного двигателя растет, растет и действующее значение тока статора двигателя, однако его значение даже при полной остановке двигателя в момент времени t_3 не превышает заданного допустимого значения $I_{1\max}$. Не превышает заданного двукратного значения и момент асинхронного двигателя. В системе автоматики каротажного подъемника предусмотрена дублирующая защита от обрыва геофизического кабеля, срабатывающая в том случае, если натяжение геофизического кабеля превысит допустимое значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная аппаратура ядерного каротажа (КСПК-III) для исследования нефтяных скважин / А.В. Кондрашов, Р.Р. Куйбышев, И.З. Миннуллин, В.Н. Даниленко // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2016. – Вып. 6 (264). – С. 164–171.
2. Разработка и внедрение методических рекомендаций по проведению измерений аппаратурой нейтронного каротажа ПРКЛ-73, ПРКЛ-73А, обработке и интерпретации результатов / А.А. Беляев, В.А. Богдан, В.М. Коровин // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2015. – Вып. 11 (257). – С. 91–97.
3. Dunn K.-J., Bergman D.J., La Torraca G.A. Nuclear Magnetic Resonance // *Petrophysical and Logging Applications*. – New York: Pergamon, 2002. – P. 94.
4. Field Test of a new Nuclear Magnetic Resonance tool / R. Khamatdinov, E. Mityushin, V. Murtsovkin, D. Tiller, J. Jonkers // *SPWLA 44 Annual Logging Symposium, 2003. Paper AAA*. – Santa Fe; New Mexico, USA, 25–30 April, 2003. – P. 165–167.
5. Технология оценки технического состояния обсаженных колонн магнитоимпульсными дефектоскопами / А.П. Потапов, В.В. Даниленко, В.Н. Даниленко, Г.И. Головацкая // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2016. – Вып. 6 (264). – С. 112–134.
6. Использование аппаратуры ЗАС-ТШ-42 в комплексе с другими методами для повышения информативности контроля технического состояния обсаженных скважин / В.Д. Ташбулатов, В.Н. Еникеев, А.Г. Кунавин, М.Я. Гайфуллин // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2016. – Вып. 6 (264). – С. 152–164.
7. Возможности применения скважинного акустического сканера САС-90 для геофизических исследований скважин / В.М. Горохов, А.Р. Садыков, О.Н. Самахин, А.А. Попов, А.С. Щербак // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2015. – Вып. 11 (257). – С. 60–71.
8. Применение сейсмоакустических методов при контроле гидроразрыва пласта / С.В. Белов, П.С. Дьяконова, Р.А. Дагилев, А.Д. Савич // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2015. – Вып. 10 (256). – С. 79–90.
9. Опыт применения магнитотеллурических исследований для изучения сложных геоэлектрических разрезов Азербайджана / Э.С. Новрузов, У.Дж. Маммадова // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2015. – Вып. 1 (247). – С. 15–23.
10. Чернышев А.Ю., Журиков С.А., Чернышев И.А. Электропривод подъемников комплексов геофизического исследования скважин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 63–67.
11. Сыромятников И.А. Синхронные двигатели. – М.: Госэнергиздат, 1959. – 224 с.
12. Чижумов С.Д. Основы гидродинамики. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 106 с.
13. Idris A., Kidouche M. Real-Time Simulation of V/F Scalar Controlled Induction Motor Using RT-Lab Platform for Educational Purpose // *Recent advances in system: Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics (SCI 2013)*. – Venice, Italy, September 28–30, 2013. – P. 189–192.
14. Akin B., Nishant G. Scalar (V/f) Control of 3-Phase Induction Motors: application report SPRABQ8 / Texas Instrument Incorporated. – Dallas, Texas: Texas Instruments, 2000. – 27 p.
15. Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. Scalar Control of Induction Motor Drives Using dSPACE DS1104 // *Recent advances in system: Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics*. – Venice, Italy, September 28–30, 2013. – P. 322–327.

16. 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.
17. Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. A DSPACE DSP Control for V/F Controlled Induction Motor Drive and Parameters Identification // Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE). – 2011. – V. 121. – P. 305–312.
18. Novel Stator Voltage Oriented V/F Control Method Capable of High Output Torque at Low Speed / W. Chen, D. Xu, R. Yang, Y. Yu, Y.A. Xu // International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS2009. – Venice, Italy, September 20–23, 2009. – P. 228–233.
19. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference. – Omsk, Russia, 21–23 May 2015. – P. 1–7.
20. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms // Strategic Technology (IFOST), 7th International Forum. – Tomsk, Russia, September 21–23, 2012. – P. 1–4.
21. Kolomyets E.A., Chernyshyov A.Yu. Observer of rotor speed and flux is developed for the vector control system of induction motor // Control and Communications (SIBCON), International Siberian Conference, 2015. – Omsk, Russia, May 21–23, 2015. – P. 1–7.
22. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 269–272.

Поступила 21.10.2016 г.

Информация об авторах

Чернышева Т.А., старший преподаватель кафедры инженерной графики и промышленного дизайна Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Журиков С.А., заместитель директора по геофизической аппаратуре ООО «АСУ-ЭКСПЕРТ».

Чернышев А.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чернышев И.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62–83–523:550.832:621.876

INDUCTION DRIVE OF WELL LOGGING TRUCK HOIST FOR VISUAL MONITORING THE BOREHOLE OPERATING CONDITIONS

Tatyana A. Chernysheva¹,
cherta@tpu.ru

Sergey A. Zhurikov²,
GurikovSA @asu-expert.ru

Aleksandr Yu. Chernyshev¹,
ach@tpu.ru

Igor A. Chernyshev¹,
chia@tpu.ru

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

² «ASU-EXPERT»,
51/1, Krasnoarmeyskaya street, Tomsk, 634029, Russia.

Relevance of the study is caused by the necessity of developing induction motor electric drives of well logging truck hoist for visual monitoring the borehole operating conditions.

The main aim of the study is to develop and research the scalar control system for electric drive comprised of frequency converter and induction motor. The system should take into account operation features and the load parameter changes in the hoist for geophysical research of boreholes.

Methods of research are based on application of automatic control theory and simulation modeling under MatLab–Simulink environment.

Results. The authors have developed the load computation method for lowering and hoisting the downhole instrument, which allows determining the power of the electric drive of the hoisting mechanism more accurately. Variable-speed electric drive comprised of frequency converter and induction motor with scalar control system were developed for geophysical hoists. The transients for all operating modes of electric drive of the well logging truck hoist were calculated, including sticking of the geophysical instrument in the borehole. The obtained results of the studies were validated by the experimental results of the developed electric drive of hoisting mechanisms for geophysical research of boreholes.

Findings. When studying the variable-speed induction motor drive with scalar control system, one should take into account the peculiarities of the PWM voltage control in the frequency converter. This allows achieving more reliable results of simulation modeling and accelerating the controllers tuning of electric drives of truck hoist. It was ascertained that the current degenerative feedback with delay in control channel of voltage and frequency limits a root-mean-square value of stator current of the variable-frequency induction motor in all normal and emergency operating modes of the truck hoist. It was ascertained as well that in all operating modes of the truck hoist the load on the motor shaft is active, therefore, while lowering the downhole instrument the induction motor operates in generator mode with power dissipation in brake resistors of the frequency converter. If the lowering of the downhole instrument lasts for a long time, than the brake resistors should have increased power ratings.

Key words:

Geophysical research of boreholes, static loads of downhole instrument, dynamic loads of downhole instrument, induction motor drive, scalar control, pulse-width modulation.

REFERENCES

1. Kondrashov A.V., Ruibyshev R.R., Minnullin I.Z., Danilenko V.N. Combined nuclear logging tools (KSPRK-SH) for oil well logging. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 264, no. 6, pp. 164–171. In Rus.
2. Belyaev A.A., Bogdan V.A., Korovin V.M. Development and introduction of procedural recommendations for neutron logging tools PRKL-73 and PRKL-73A operation, data processing and interpretation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2015, vol. 257, no. 11, pp. 91–99. In Rus.
3. Dunn K.-J., Bergman D.J., LaTorraca G.A. *Nuclear Magnetic Resonance. Petrophysical and Logging Applications*. New York, Pergamon, 2002. pp. 94.
4. Khamatdinov R., Mityushin E., Murtsovkin V., Tiller D., Jonkers J. Field Test of a new Nuclear Magnetic Resonance tool. *SPWLA 44 Annual Logging Symposium*, 2003. Paper AAA. Santa Fe; New Mexico, USA, 25–30 April, 2003. pp. 165–167.
5. Potapov A.P., Danilenko V.V., Danilenko V.N., Golovatskaya G.I. Technique of assessment of technical state of casing string by magnetic pulse defectoscopes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 264, no. 6, pp. 112–134. In Rus.
6. Tashbulatov V.D., Enikeev V.N., Kunavin A.G., Gayfullin M.Ya. Using the ZAS-Tsh-42 tool combined with the other methods to enrich the information value of technical state control in the cased wells. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2016, vol. 264, no. 6, pp. 152–164. In Rus.
7. Gorokhov V.M., Sadikov A.R., Samokhin O.N., Popov A.A., Shcherbak A.S. Possibilities of using the sonic borehole scanner SAS-90 for well logging. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2015, vol. 257, no. 11, pp. 60–71. In Rus.

8. Belov S.V., Dyakonova P.S., Dyagilev R.A., Savich A.D. Using seismoacoustic methods for hydrofrac control. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2015, vol. 256, no. 10, pp. 79–90. In Rus.
9. Navruzov E.S., Mammadova U. Dzh. The experience on applying magnetotelluric investigations to study the complex geoelectric sections of Azerbaijan. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2015, vol. 247, no. 1, pp. 15–23. In Rus.
10. Chernyshev A.Yu., Zhurikov S.A., Chernyshev I.A. Electric drive of elevators for borehole geophysical survey complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 3, pp. 63–69.
11. Syromyatnikov I.A. *Sinkhronnye dvigateli* [Synchronous motors]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959. 224 p.
12. Chizhiumov S.D. *Osnovy gidrodinamiki* [Basics of hydrodynamics]. Komsomolsk-on-Amur, KnASTU Publ., 2007. 106 p.
13. Idir A., Kidouche M. Real-Time Simulation of V/F Scalar Controlled Induction Motor Using RT-Lab Platform for Educational Purpose. *Recent advances in system: Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics*. Venice, Italy, September 28–30, 2013. pp 189–192.
14. Akin B., Nishant G. *Scalar (V/f) Control of 3-Phase Induction Motors: application report SPRABQ8 / Texas Instrument Incorporated*. Dallas, Texas, Texas Instruments, 2000. 27 p.
15. Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. Scalar Control of Induction Motor Drives Using dSPACE DS1104. *Recent advances in system: Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics*. Venice, Italy, September 28–30, 2013. P. 322–327.
16. Beaulieu S., Ouhrouche M., Dufour C., Allaire P.F. Real-time Modeling and Simulation of an Active Power Filter. *Proc. of Ninth IASTED International Conference on Power and Energy Systems – PES 2007*. Clearwater, Florida, USA, January 3–5, 2007. pp. 128–133.
17. Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. A DSPACE DSP Control for V/F Controlled Induction Motor Drive and Parameters Identification. *Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE)*, 2011, vol. 121, pp. 305–312.
18. Chen W., Xu D., Yang R., Yu Y., Xu Y. A Novel Stator Voltage Oriented V/F Control Method Capable of High Output Torque at Low Speed. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS2009*. Venice, Italy, September 20–23, 2009. pp. 228–233.
19. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters. *Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference*. Omsk, Russia, 21–23 May 2015. pp. 1–7.
20. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms. *Strategic Technology (IFOST), 7th International Forum*. Tomsk, Russia, September 21–23, 2012. pp. 1–4.
21. Kolomiyets E.A., Chernyshyov A.Yu. Observer of rotor speed and flux is developed for the vector control system of induction motor. *Control and Communications (SIBCON), International Siberian Conference*. Omsk, Russia, May 21–23 2015. pp. 1–7.
22. Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po katalognym dannym [Determination of induction motor drive parameters according to the catalogue]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of the International scientific conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2007. pp. 269–272.

Received: 21 October 2016.

Information about the authors

Tatyana A. Chernysheva, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey A. Zhurikov, Deputy director, «ASU-EXSPERT».

Aleksandr Yu. Chernyshev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor A. Chernyshev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.31:629.78

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Донцов Олег Анатольевич¹,
badzed_bz@mail.ru

Иванчура Владимир Иванович¹,
ivan43ura@yandex.ru

Краснобаев Юрий Вадимович¹,
uvkras@mail.ru

Пост Сергей Сергеевич¹,
serseric@mail.ru

¹ Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корп. УЛК.

Разнородные и однородные источники энергии, обладающие различными характеристиками, повсеместно используются в автономных системах электропитания. В качестве источников энергии в наземных автономных системах электропитания в основном служат возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, геотермальная и гидроэнергия. Комбинация разнородных источников энергии в составе автономной системы электропитания позволяет снизить зависимость требуемой генерируемой мощности от изменяющихся внешних условий. Согласование первичных источников энергии с различными характеристиками и условиями работы в рамках одной системы электропитания приводит к возникновению дополнительных сложностей, связанных с регулированием мощности источников, что и определяет актуальность рассматриваемых задач.

Цель исследования: разработка способов объединения первичных источников энергии с различными характеристиками и условиями работы в единую автономную систему электропитания и алгоритмов управления контроллерами этих источников.

Задачи: создание имитационной модели системы электропитания в среде MATLAB/Simulink; разработка и проверка алгоритма управления контроллерами первичных источников, обеспечивающего поддержание желаемого тока заряда аккумуляторной батареи системы электропитания; разработка и проверка алгоритмов управления контроллерами первичных источников, обеспечивающих отбор максимальной мощности от каждого из нескольких первичных источников, в том числе и с минимизацией времени поиска точки максимальной мощности.

Методы исследования: имитационное моделирование системы электропитания с использованием языка Simulink, входящего в состав программного пакета MATLAB 7.9.

Результаты. Разработана имитационная модель системы электропитания, включающая два источника энергии с различными характеристиками. При избытке мощности, генерируемой первичным источником энергии, контроллер источника энергии находится в режиме заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током. При дефиците мощности первичного источника контроллер функционирует в режиме поиска экстремальной мощности. Структура системы электропитания позволяет управлять двумя источниками энергии независимо друг от друга. Таким образом, контроллеры источников энергии могут находиться в различных режимах работы, обеспечивая повышенную гибкость системы электропитания. Использование алгоритма управления на нечеткой логике увеличивает скорость поиска точки максимальной мощности, а также повышает точность работы алгоритма. Проведенные с использованием разработанной модели испытания подтвердили работоспособность алгоритмов управления контроллеров солнечной батареи во всех режимах работы. Подтверждена работоспособность алгоритма выбора режима работы контроллеров в различных условиях. Предложенные алгоритмы позволяют осуществлять эффективное регулирование мощности первичных источников энергии в зависимости от различных условий работы автономной системы электропитания.

Ключевые слова:

Автономная система электропитания, солнечная батарея, контроллер солнечной батареи, имитационная модель, аккумуляторная батарея, экстремальное регулирование.

Введение

Разнородные и однородные источники энергии, обладающие различными характеристиками, повсеместно используются в автономных системах электропитания (СЭП). В качестве источников энергии в наземных автономных СЭП в основном служат возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, геотермальная и гидроэнергия [1–5]. Применение различных комбинаций разнородных источников энергии позволяет снизить зависимость потребителя от изме-

няющихся внешних условий, влияющих на выход полезной мощности автономной СЭП [2, 4]. Первичными источниками (ПИ) энергии в системах электропитания космического базирования в основном являются солнечные батареи (СБ) [6–9]. Согласование первичных источников энергии с различными характеристиками и условиями работы в рамках одной системы электропитания приводит к возникновению дополнительных сложностей, связанных с регулированием мощности ПИ.

Постановка задачи

Автономные системы электропитания постоянного тока включают в себя непосредственно первичные источники энергии, аккумуляторную батарею (АБ), кабельную сеть и контроллеры ПИ, выполненные в виде конверторов с устройствами управления.

В настоящей работе рассматриваются алгоритмы функционирования и устройство контроллеров СБ в составе автономной системы электропитания с солнечными батареями в качестве первичных источников энергии. Алгоритм функционирования контроллера СБ должен обеспечивать заряд АБ постоянным током заданной величины, а также дозаряд АБ снижающимся током при поддержании некоторого заданного фиксированного напряжения на АБ в случае, когда текущая мощность СБ превышает суммарную мощность, потребляемую нагрузкой и АБ. В случае, когда текущая мощность СБ меньше суммарной мощности, потребляемой нагрузкой и АБ, контроллер СБ работает в режиме поиска экстремальной мощности и обеспечивает отбор максимальной мощности от СБ.

В состав СЭП микроспутников и малых космических аппаратов (КА), как правило, входят несколько секций солнечных батарей, расположенных на каждой стороне космического аппарата [6–8]. Следовательно секции СБ такого КА находятся в различных условиях освещения и вносят различный вклад в суммарную мощность СЭП. При этом секции СБ могут обладать различными характеристиками, а максимальная мощность, которую может генерировать каждая секция СБ, зависит не только от индивидуальных характеристик секции, но и от ориентации секции на Солнце.

При параллельном включении нескольких СБ с различными характеристиками на общую нагрузку с использованием общего преобразователя напряжения [6, 7] положение рабочих точек на мощностной характеристике каждого источника энергии не может регулироваться в отдельности, так как контроллер СБ в таком случае будет обеспечивать регулирование положения рабочей точки на результирующей мощностной характеристике параллельно соединенных СБ. В режиме отбора экстремальной мощности это приводит к снижению суммарной мощности, отдаваемой СБ в нагрузку. Таким образом, появляется необходимость применения индивидуальных контроллеров СБ, что может обеспечить регулирование положения рабочих точек на мощностных характеристиках СБ независимо друг от друга.

Современное развитие микроконтроллерной техники позволяет уменьшить размеры управляющего устройства и реализовать управление контроллером СБ на основе микроконтроллера [10]. При этом появляется возможность реализовать не только пошаговый алгоритм поиска экстремальной мощности СБ [11–13], но и более сложные алгоритмы, позволяющие ускорить процесс поиска эк-

стремума и повысить уровень мощности, генерируемой СБ за счет снижения амплитуды колебаний рабочей точки на вольтамперной характеристике СБ в окрестности точки максимальной мощности [14, 15]. Ускорение процесса поиска экстремума особенно актуально для режима «закрутки» КА, при котором происходит вращение КА вокруг своей оси с некоторой угловой скоростью [7, 8]. Решения по реализации системы электропитания с несколькими источниками энергии, а также алгоритмы управления контроллеров СБ и рассматриваются в настоящей статье.

Решение задачи

При решении задачи регулирования мощности каждого первичного источника в отдельности воспользуемся структурной схемой автономной СЭП, приведенной на рис. 1.

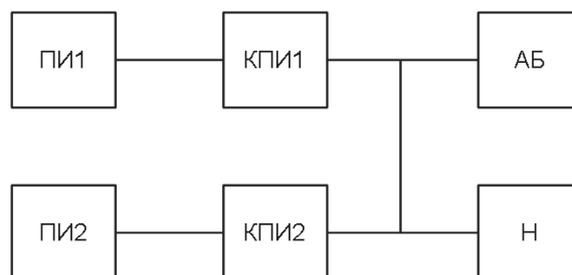


Рис. 1. Структурная схема автономной системы электропитания с двумя первичными источниками энергии

Fig. 1. Block diagram of autonomous power supply system with two primary energy sources

В соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1, источники энергии ПИ1 и ПИ2 подключаются последовательно к контроллерам КПИ1 и КПИ2. Выходные клеммы контроллеров КПИ1 и КПИ2 подключаются к аккумуляторной батарее (АБ) и нагрузке Н. Таким образом, появляется возможность реализовать независимое управление источниками энергии и обеспечить работу следующих режимов работы контроллеров:

- режим заряда АБ постоянным током заданной фиксированной величины;
- режим поиска экстремальной мощности солнечной батареи.

При избытке мощности первичного источника и необходимости заряда АБ контроллер СБ осуществляет заряд аккумуляторной батареи постоянным током заданной фиксированной величины $I_{АБ,опт}$, при условии ограничения напряжения $U_{АБ}$ на АБ. На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током.

Согласно алгоритму, контроллер СБ считывает сигналы напряжения и тока АБ, после чего выполняется проверка условия достижения напряжения на АБ своего максимального значения. Если это условие соблюдается, то контроллер СБ отключает аккумуляторную батарею от источника энергии. Если условие не соблюдается, то происходит про-

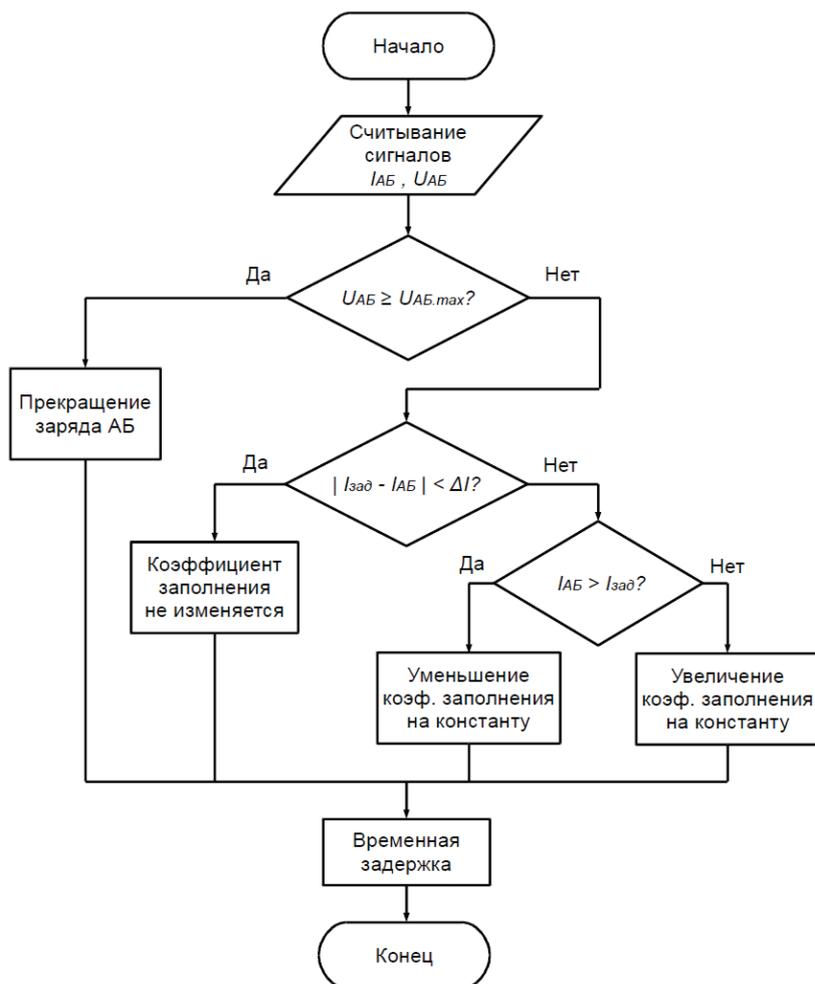


Рис. 2. Алгоритм работы режима заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током

Fig. 2. Flowchart of the algorithm of specified fixed current battery charging mode

верка равенства текущего значения тока и заданного значения оптимального тока заряда. Если текущее значение тока находится в некотором заданном интервале, то есть равно оптимальному зарядному току с некоторой погрешностью, то коэффициент заполнения управляющих импульсов остается неизменным. Если ток заряда меньше заданного с учетом погрешности, то происходит увеличение коэффициента заполнения импульсов на некоторую величину, в противном случае происходит его уменьшение. Величина изменения коэффициента заполнения импульсов за один шаг работы алгоритма задается программно и не изменяется в процессе работы алгоритма.

В случае дефицита мощности первичного источника контроллер СБ осуществляет отбор экстремальной мощности солнечной батареи, функционируя в соответствии с разработанным алгоритмом поиска экстремальной мощности. В режиме поиска экстремальной мощности рабочая точка на мощностной характеристике СБ совершает колебания в окрестности точки максимальной мощности. При этом часть мощности СБ, превышаю-

щая мощность, потребляемую нагрузкой, поступает на заряд АБ. На рис. 3 приведена блок-схема пошагового алгоритма работы контроллера в режиме поиска экстремальной мощности [14].

В режиме поиска экстремальной мощности контроллер считывает сигналы тока и напряжения СБ, а затем перемножает их. Если замер сигналов проводится в первый раз, то текущая мощность определяется как мощность, полученная от СБ на предыдущем шаге. Далее происходит увеличение коэффициента заполнения импульсов управления на некоторую величину k , определяемую регулятором на основе нечеткой логики, затем снова производится вычисление текущей мощности СБ. Если мощность увеличилась по сравнению с запомненной на предыдущем шаге, то происходит дальнейшее увеличение коэффициента заполнения. В случае, когда измеренная мощность уменьшается, происходит изменение направления движения рабочей точки по мощностной характеристике СБ, а следовательно, и уменьшение коэффициента заполнения импульсов управления.

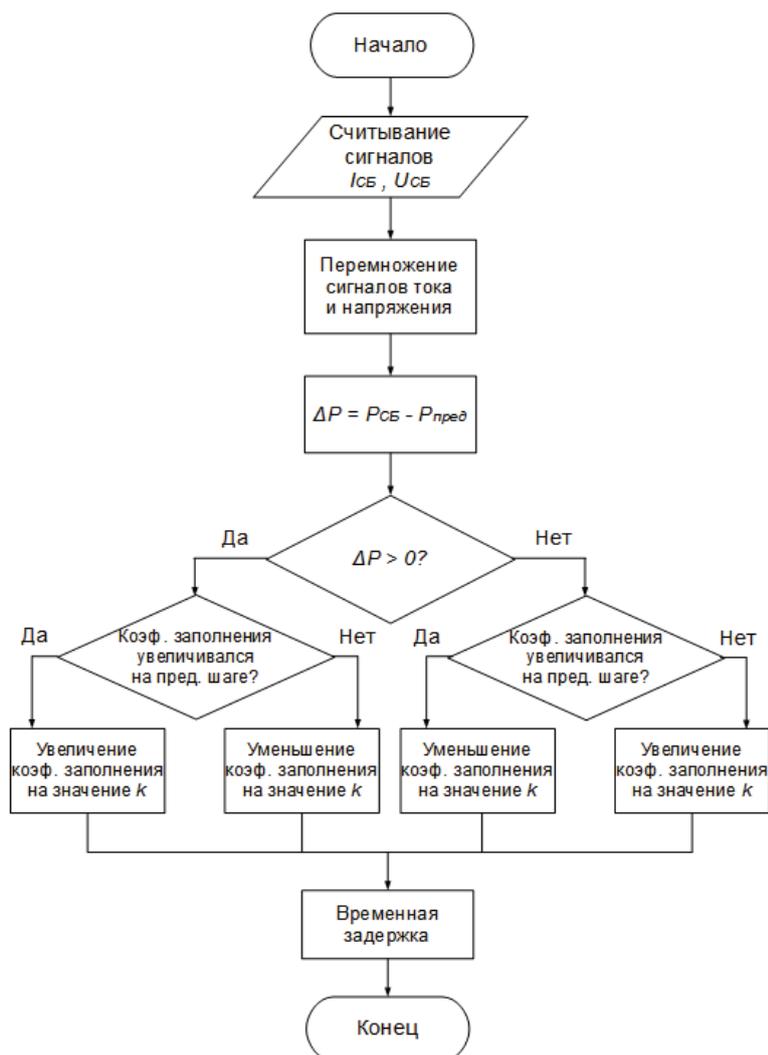


Рис. 3. Алгоритм работы режима поиска экстремальной мощности

Fig. 3. Flowchart of maximum power point tracking algorithm

Значение шага k в режиме поиска экстремальной мощности вычисляется блоком управления на нечеткой логике [16–18], входными переменными которого являются производная мощности по напряжению dP/dV за один шаг поиска экстремальной мощности, а также абсолютное изменение мощности dP за этот шаг. Нечеткие термы значений шага k в зависимости от значений термов входных переменных регулятора приведены в таблице.

Выбор текущих режимов работы контроллеров СБ определяется блоком выбора режимов (БВР). Блок-схема алгоритма работы БВР функционирования контроллеров СБ приведена на рис. 4.

Блок выбора режимов на каждом шаге работы определяет контроллер СБ с наибольшим значением текущей мощности. В случае, если контроллер СБ с наибольшим значением мощности функционирует в режиме заряда АБ фиксированным током, а текущее значение зарядного тока $I_{АБ}$ меньше заданного $I_{АБ.опт}$, этот контроллер переводится в ре-

жим поиска экстремальной мощности. Выбор контроллера СБ с наибольшим значением мощности обусловлен потенциально наибольшим ростом отдаваемого источником в нагрузку и на заряд АБ тока после перевода его в режим поиска экстремальной мощности. Это позволяет сократить время на переключение режимов работы других контроллеров СБ в случае, когда перевод одного контроллера в режим поиска экстремальной мощности позволяет добиться заданного значения зарядного тока $I_{АБ.опт}$. Если контроллеры функционируют в режиме поиска экстремальной мощности, а значение зарядного тока $I_{АБ}$ все еще меньше заданного $I_{АБ.опт}$, режим работы контроллера не изменяется, так как в этом случае обеспечить дальнейший рост передаваемой от источников мощности не является возможным. В случае, когда контроллеры СБ функционируют в режиме поиска экстремальной мощности, а значение зарядного тока $I_{АБ}$ превышает заданное значение $I_{АБ.опт}$, все контроллеры СБ перево-

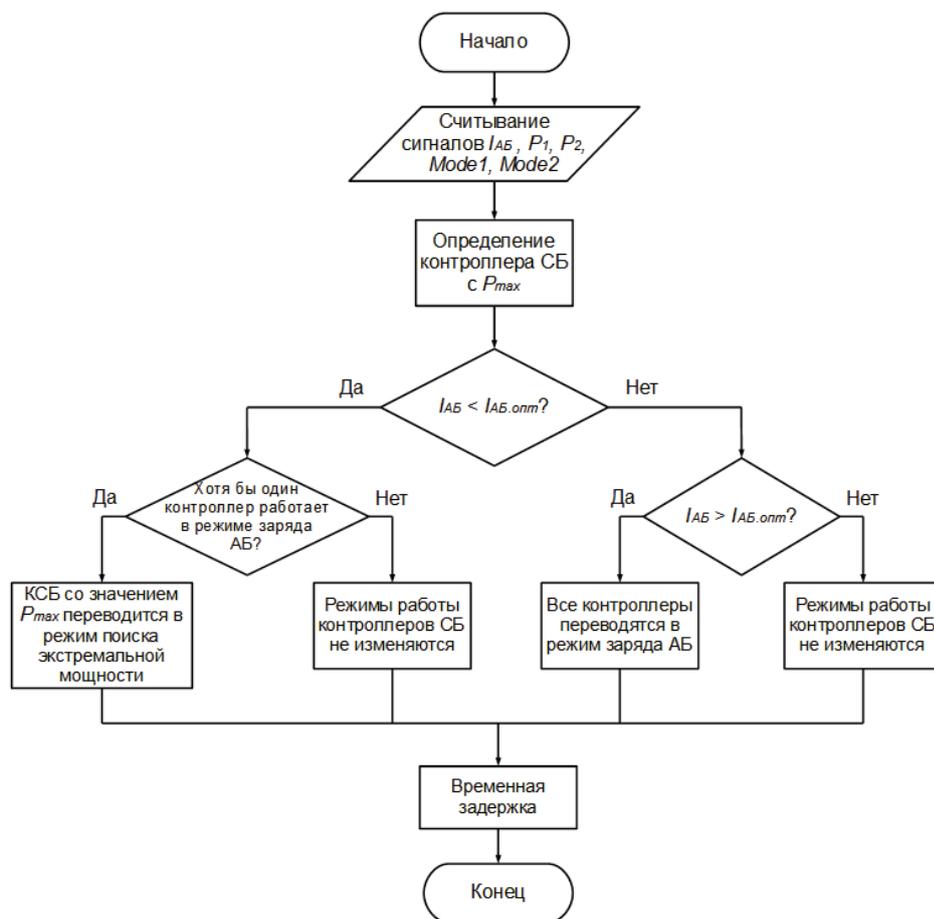


Рис. 4. Алгоритм работы блока выбора режимов функционирования контроллеров СБ

Fig. 4. Flowchart of algorithm of solar controller operation modes selection

Таблица. Значения термов шага k в режиме поиска экстремальной мощности

Table. Values of k step terms in the maximum power point tracking mode

dP/dV	NL (Negative large) Большое отрицательное	NS (Negative small) Малое отрицательное	NZ (Near zero) Близкое к нулю	PS (Positive small) Малое положительное	PL (Positive large) Большое положительное
NL (Negative large) Большое отрицательное	Наивысшее Highest	Высокое High	Среднее Moderate	Высокое High	Наивысшее Highest
NM (Negative moderate) Умеренное отрицательное	Высокое High	Среднее Moderate	Низкое Low	Среднее Moderate	Высокое High
NS (Negative small) Малое отрицательное	Среднее Moderate	Низкое Low	Наименьшее Lowest	Низкое Low	Среднее Moderate
NZ (Near zero) Близкое к нулю	Низкое Low	Наименьшее Lowest	Наименьшее Lowest	Наименьшее Lowest	Низкое Low
PS (Positive small) Малое положительное	Среднее Moderate	Низкое Low	Наименьшее Lowest	Низкое Low	Среднее Moderate
PM (Positive moderate) Умеренное положительное	Высокое High	Среднее Moderate	Низкое Low	Среднее Moderate	Высокое High
PL (Positive large) Большое положительное	Наивысшее Highest	Высокое High	Среднее Moderate	Высокое High	Наивысшее Highest

дятся в режим заряда АБ фиксированным током. Каждый цикл работы блока выбора режимов заканчивается временной задержкой, необходимой для завершения переходных процессов после изменения режима работы контроллера СБ.

Для проверки предложенных алгоритмов управления была разработана имитационная модель системы электропитания в среде *MATLAB/Simulink*, представленная на рис. 5.

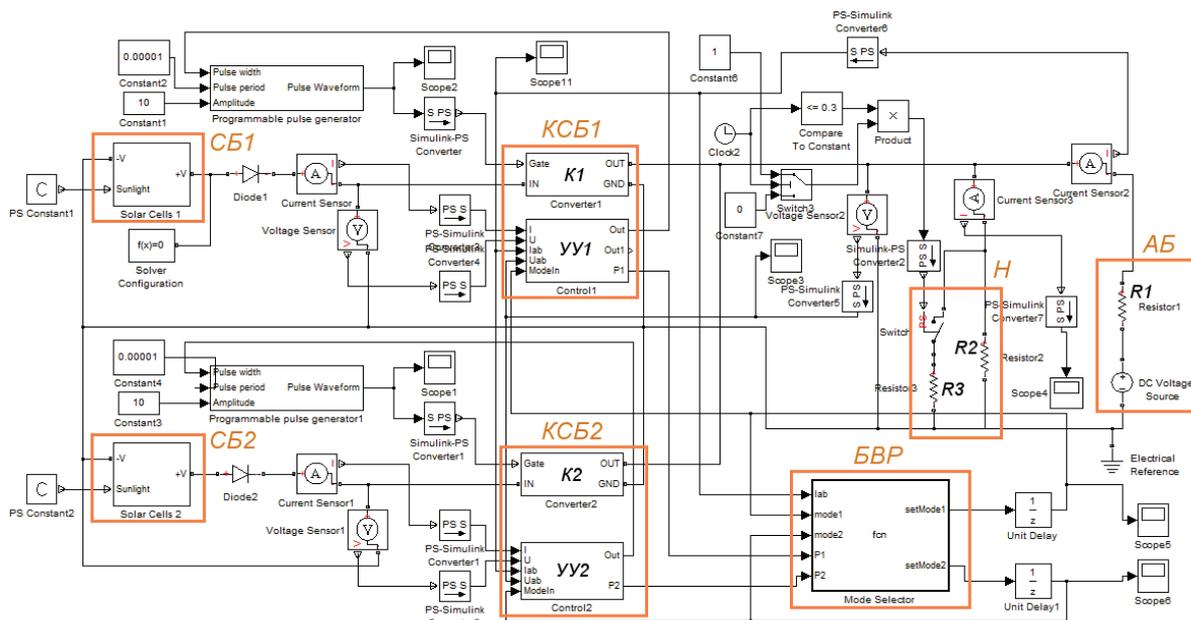


Рис. 5. Имитационная модель системы электропитания с двумя первичными источниками

Fig. 5. Simulation model of the power supply system with two primary energy sources

Имитационная модель системы электропитания содержит два первичных источника энергии, представленных солнечными батареями (Solar Cells) *CB1* и *CB2*, представляющими собой несколько последовательно включенных солнечных элементов из библиотеки компонентов *Simscape* [19]. *CB1* и *CB2* подключены к контроллерам *CB* *KCB1* и *KCB2*, работающим на общую нагрузку *H* в виде резисторов *R2* и *R3* и аккумуляторную батарею *AB* с внутренним сопротивлением *R1*. Контроллеры *CB* состоят из устройств управления (Control) *UY1* и *UY2* вместе с конвертерами напряжения (Converter) *K1* и *K2* и представляют собой функциональные блоки, алгоритмы функционирования которых выполнены в соответствии с алгоритмами управления, приведенными на рис. 2, 3. Конвертеры *K1* и *K2*, входящие в состав контроллеров *KCB1* и *KCB2*, выполнены в соответствии со схемой понижающего преобразователя напряжения [6, 11–14]. *BBP* является функциональным блоком, который содержит m-код в качестве встроенной функции для среды *Simulink* [20]. На вход блока выбора режимов поступают сигналы о текущем режиме работы каждого контроллера, текущие значения мощности каждого источника энергии, а также текущее значение тока I_{AB} аккумуляторной батареи. Алгоритм функционирования *BBP* выполнен в соответствии с приведенной на рис. 4 блок-схемой.

Сравнительный анализ работы алгоритмов поиска экстремальной мощности с фиксированным и переменным шагом приведен на рис. 6.

В результате анализа временных диаграмм работы алгоритмов поиска экстремальной мощности было установлено, что использование переменного

шага в алгоритме поиска экстремальной мощности на основе нечеткой логики увеличивает скорость поиска точки максимальной мощности на 50,8 %. Разработанный с использованием средств нечеткой логики алгоритм поиска экстремальной мощности с переменным шагом также уменьшает недоиспользование мощности *CB*, вызванное колебаниями рабочей точки относительно точки максимума мощности *CB*, на 2,8 %.

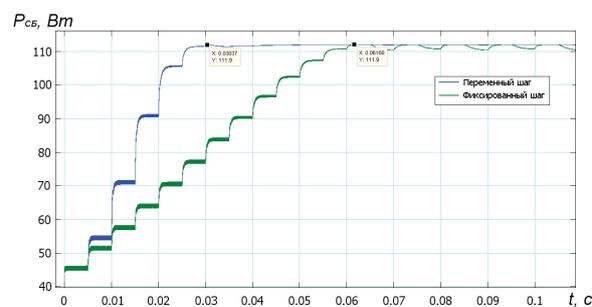


Рис. 6. Временные диаграммы мощности P_{CB} солнечной батареи в режиме поиска экстремальной мощности

Fig. 6. Change in solar panel power in the maximum power point tracking mode

На рис. 7 приведена временная диаграмма тока I_{AB} аккумуляторной батареи, поясняющая процесс изменения режимов работы контроллеров *CB*.

В интервал времени от $t=0$ до t_0 контроллеры системы электропитания не изменяют коэффициента заполнения управляющих импульсов конвертеров и ток I_{AB} заряда *AB* остается неизменным. В момент времени t_0 оба контроллера системы электропитания переводятся в режим заряда *AB* заданным фиксированным током. В это время про-

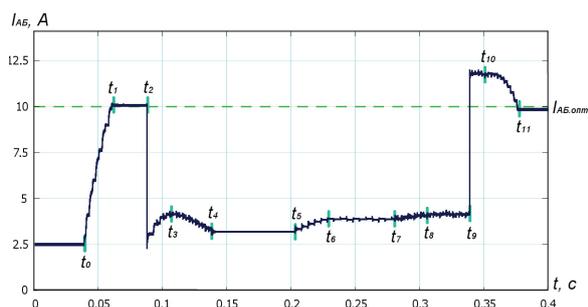


Рис. 7. Временная диаграмма тока I_{AB} аккумуляторной батареи в процессе переключения режимов работы контроллеров СБ

Fig 7. Change in battery current in the process of solar controllers modes switching

исходит постепенное увеличение коэффициента заполнения управляющих импульсов, что приводит к росту тока I_{AB} вплоть до значения оптимального тока заряда $I_{AB,опт}=10$ А. В момент времени t_1 процесс увеличения коэффициента заполнения импульсов заканчивается, так как значение зарядного тока I_{AB} становится равным $I_{AB,опт}$ с некоторой заданной погрешностью. В момент времени t_2 происходит подключение дополнительной нагрузки, что приводит к ступенчатому увеличению тока нагрузки и снижению зарядного тока I_{AB} , после чего контроллер начинает процесс увеличения коэффициента заполнения импульсов с целью достижения зарядным током заданного оптимального значения $I_{AB,опт}$. В момент времени t_3 рабочие точки на характеристиках солнечных батарей СБ1 и СБ2 находятся в окрестностях точки максимума мощности, но контроллеры, в соответствии с алгоритмом управления, продолжают процесс увеличения коэффициента заполнения импульсов управления вплоть до момента времени t_4 , когда достигается максимальное значение коэффициента заполнения. Так как оптимальное значение зарядного тока $I_{AB,опт}=10$ А не было достигнуто в процессе работы алгоритма режима заряда АБ, в момент времени t_5 контроллер СБ с самым высоким значением текущей мощности (в данном случае СБ1) переключается в режим поиска экстремальной мощности и рабочая точка на мощностной характеристике СБ1 начинает движение в сторону точки максимальной мощности солнечной батареи. К моменту времени t_6 рабочая точка на мощностной характеристике СБ1 достигает окрестности точки максимальной мощности, что, однако, не приводит к достижению зарядным током I_{AB} заданного оптимального значения $I_{AB,опт}$. Далее, в момент времени t_7 , контроллер СБ с меньшим значением текущей мощности (СБ2) переключается в режим поиска экстремальной мощности и рабочая точка на мощностной характеристике СБ2 начинает движение в сторону точки максимальной мощности.

К моменту времени t_8 рабочая точка на мощностной характеристике СБ2 достигает окрестности точки максимальной мощности. В момент времени t_9 происходит отключение дополнительной нагрузки, что приводит к ступенчатому уменьшению тока нагрузки и увеличению зарядного тока I_{AB} . В момент времени t_{10} блок выбора режима в соответствии с алгоритмом работы переключает оба контроллера в режим заряда АБ фиксированным током, после чего начинается процесс уменьшения коэффициента заполнения импульсов с целью достижения зарядным током заданного оптимального значения $I_{AB,опт}$. К моменту времени t_{11} ток заряда I_{AB} аккумуляторной батареи вновь достигает своего оптимального значения $I_{AB,опт}=10$ А с некоторой заданной погрешностью.

Заключение

1. При наличии в составе автономной системы электропитания нескольких источников электрической энергии, включая и накопители энергии, возникают задачи их согласованной совместной работы с целью их эффективного использования, в частности задача максимального отбора энергии от возобновляемых источников энергии.
2. Разработана имитационная модель системы электропитания, включающая два источника энергии с различными характеристиками. При избытке мощности, генерируемой первичным источником энергии, контроллер источника энергии находится в режиме заряда аккумуляторной батареи заданным фиксированным током. При дефиците мощности первичного источника контроллер функционирует в режиме поиска экстремальной мощности. Структура системы электропитания позволяет управлять двумя источниками энергии независимо друг от друга. Таким образом, контроллеры источников энергии могут находиться в различных режимах работы, обеспечивая повышенную гибкость системы электропитания. Использование алгоритма управления на нечеткой логике увеличивает скорость поиска точки максимальной мощности, а также повышает точность работы алгоритма.
3. Проведенные с использованием разработанной модели испытания подтвердили работоспособность алгоритмов управления контроллеров солнечной батареи во всех режимах работы. Подтверждена работоспособность алгоритма выбора режима работы контроллеров в различных условиях. Предложенные алгоритмы позволяют осуществлять эффективное регулирование мощности первичных источников энергии в зависимости от различных условий работы автономной системы электропитания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carr G. Alternative energy will no longer be alternative. The Economist. URL: <http://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands> (дата обращения: 12.04.2016).
2. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2012. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf (дата обращения: 12.04.2016).
3. Trends 2013 in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2012. URL: http://helapco.gr/pdf/IEA_PVPS_Trends_Report_2013_v1_0_01.pdf (дата обращения: 12.04.2016).
4. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотноков И.А. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.
5. International Renewable Energy Agency: Vision and Mission. URL: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=cat&PriMenuID=13&CatID=9> (дата обращения: 12.04.2016).
6. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.
7. Spacecraft Systems Engineering. 4th ed. / Eds. P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 724 p.
8. Norton C., Pellegrino S., Johnson M. Small Satellites: a Revolution in Space Science. 2014, July. URL: <http://www.kiss.caltech.edu/study/smallsat/KISS-SmallSat-FinalReport.pdf> (дата обращения: 12.04.2016).
9. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение. URL: <http://jurnal.vniem.ru/text/102/2.pdf> (дата обращения: 24.04.2016).
10. Развитие микропроцессорной техники. Структура и режимы современных микропроцессоров. URL: http://life-prog.ru/vi-ew_articles.php?id=334 (дата обращения: 24.04.2016).
11. Донцов О.А. Использование экстремального регулятора в автономных системах электропитания. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis/s006/s006-040.pdf> (дата обращения: 12.04.2016).
12. Контроллер солнечной батареи с экстремальным регулированием / В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев, О.А. Донцов, С.С. Пост // Электромеханические преобразователи энергии: VI Междунар. науч.-техн. конф. ЭПЭ-2013. – Томск, 2013. – С. 180–185.
13. Имитационная модель контроллера солнечной батареи / С.С. Пост, О.А. Донцов, В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 114–120.
14. Dontsov O., Ivanchura V., Krasnobaev Y. A Fuzzy Logic Solar Controller with Maximum Power Point Tracking. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – V. 6 (8). – P. 786–794.
15. An Asymmetrical Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems / C. Liu, J. Chen, Y. Liu, Z. Yang // Energies. – 2014. – Iss. 7. – P. 2178–2193.
16. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. Прикладные нечеткие системы / пер. с япон.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
17. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
18. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (дата обращения: 12.04.2016).
19. Ibbini M., Mansi S. Simscape solar cells model analysis and design // Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy. – Kuala Lumpur, WSEAS Press, 2014. – P. 97–103.
20. Схемотехническое моделирование в Simscape и SimElectronics. URL: http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2014_4_174.php (дата обращения: 12.04.2016).

Поступила 21.11.2016 г.

Информация об авторах

Донцов О.А., аспирант кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

Иванчура В.И., доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

Краснобаев Ю.В., доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

Пост С.С., аспирант кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета.

UDC 621.31:629.78

AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING OF PRIMARY ENERGY SOURCES

Oleg A. Dontsov¹,
badzed_bz@mail.ru

Vladimir I. Ivanchura¹,
ivan43ura@yandex.ru

Yury V. Krasnobaev¹,
uvkras@mail.ru

Sergey S. Post¹,
serseric@mail.ru

¹ Siberian Federal University,
26, Kirensky street, Krasnoyarsk, 660074, Russia.

Heterogeneous and homogeneous energy sources with different characteristics are frequently used in autonomous power supply systems. The renewable energy sources such as solar, wind, geothermal and hydro energy mainly serve as primary energy sources of terrestrial autonomous power supply systems. A combination of different energy sources as a part of an autonomous power supply system allows reducing the dependence of the required generated power from unstable ambient conditions. Matching of the primary energy sources with different characteristics and operating conditions in the same power supply system leads to additional difficulties related to power control of energy sources. These difficulties determine the relevance of the study.

The main aim of the study is to develop the primary energy sources combination and control techniques so that the primary energy sources with different characteristics and operating conditions could operate in the same power supply system.

The objectives of the study are to develop the simulation model of the power supply system using MATLAB/Simulink software; to develop and test the primary energy source controllers operation algorithms that would allow maintaining the required battery charging current and operation of the primary energy sources in the maximum power point tracking mode and minimization of the maximum power point search time.

Methods used in the study: the simulation of a power supply system with the use of MATLAB 7.9 Simulink software.

Results. The authors have developed the simulation model of a power supply system that includes two primary energy sources with different characteristics. When there is an excess of power generated by the primary energy source, its controller operates in the battery charging mode. When the primary source power shortage occurs, its controller operates in the maximum power point tracking mode. The proposed power supply system structure allows controlling two energy sources independently, thus the primary energy source controllers could operate in different modes, providing more flexibility to the power supply system. The use of fuzzy logic control algorithm increases the accuracy and search speed of the maximum power point tracking algorithm. The results of simulation confirmed the efficiency of the proposed solar controller operation algorithms in all modes stated above. The efficiency of controller operation modes selection algorithm was confirmed in different operating conditions. The proposed algorithms allow controlling effectively the primary power sources power depending on the different power supply system operating conditions.

Key words:

Autonomous power supply system, solar cell, solar controller, simulation model, battery, maximum power point tracking.

REFERENCES

1. Carr G. Alternative energy will no longer be alternative. *The Economist*. Available at: <http://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands> (accessed 12 April 2016).
2. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y. *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. 2012. Available at: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf (accessed 12 April 2016).
3. *Trends 2013 in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2012*. Available at: http://helapco.gr/pdf/IEA_PVPS_Trends_Report_2013_y1_0_01.pdf (accessed 12 April 2016).
4. Lukutin B.V. *Detsentralizovannye sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami* [Decentralized power supply systems with wind and solar power stations]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. 100 p.
5. *International Renewable Energy Agency: Vision and Mission*. Available at: <http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=cat&PriMenuID=13&CatID=9> (accessed 13 April 2016).
6. Soustin B.P. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft power supply systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 318 p.
7. *Spacecraft Systems Engineering*. 4th ed. Eds. P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 724 p.
8. Norton C., Pellegrino S., Johnson M. *Small Satellites: A Revolution in Space Science*. 2014, July. Available at: <http://www.kiss.caltech.edu/study/smallsat/KISS-SmallSat-FinalReport.pdf> (accessed 14 April 2016).
9. Makridenko L.A., Boyarchuk K.A. *Mikrospuntniki. Tendentsiya razvitiya. Osobennosti rynka i sotsialnoe znachenie* [Microsatellites. Development trend. Market characteristics and social impact]. Available at: <http://jurnal.vniem.ru/text/102/2.pdf> (accessed 24 April 2016).
10. *Razvitie mikroprotssessorovoy tekhniki. Struktura i rezhimy sovremennykh mikroprotssessorov* [Development of microprocessor technology. Structure and mode of modern microprocessors]. Available at: http://life-prog.ru/view_articles.php?id=334 (accessed 24 April 2016).

11. Dontsov O.A. *Ispolzovanie ekstremalnogo regulatora v avtonomnykh sistemakh elektropitaniya* [Use of an extremum regulator in autonomous power supply systems]. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis/s006/s006-040.pdf> (accessed 12 April 2016).
12. Ivanchura V.I. *Kontroller solnechnoy batarei s ekstremalnym regulirovaniem* [Solar cell controller with maximum power point tracking]. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii. VI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya* [Electromechanical energy converters. VI International research conference]. Tomsk, 9–11 October 2013. Vol. 6, pp. 180–185.
13. Post S.S. Simulation model of a solar cell controller. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 111–120. In Rus.
14. Dontsov O., Ivanchura V., Krasnobaev Yu. A Fuzzy Logic Solar Controller with Maximum Power Point Tracking. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 6 (8), pp. 786–794.
15. Liu C., Chen J., Liu Y., Yang Z. An Asymmetrical Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Energies*, 2014, vol. 7, pp. 2178–2193.
16. Asai K. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy systems]. Translated from Japanese. Moscow, Mir Publ., 1993. 368 p.
17. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy systems simulation in MATLAB and fuzzyTECH software]. Saint-Petersburg, BKV-Petersburg Publ., 2005. 736 p.
18. Shtovba S.D. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku* [Introduction to fuzzy set theory and fuzzy logic]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (accessed 12 April 2016).
19. Ibbini M. Simscape solar cells model analysis and design. *Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy*. Kuala Lumpur, WSEAS Press, 2014. pp. 97–103.
20. *Skhemotekhnicheskoe modelirovanie v Simscape i SimElectronics* [Schematic simulation in the Simscape and SimElectronics software]. Available at: http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2014_4_174.php (accessed 11 April 2016).

Received: 21 November 2016.

Information about the authors

Oleg A. Dontsov, postgraduate student, Siberian Federal University.

Vladimir I. Ivanchura, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.

Yury V. Krasnobaev, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.

Sergey S. Post, postgraduate student, Siberian Federal University.

УДК 532.529.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ В РЕЖИМЕ ГАЗЛИФТА

Евсеев Алексей Романович,

evseev@itp.nsc.ru

Сибирское отделение Российской академии наук,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1.

Актуальность. Проблема надежного проектирования газлифтных подъемников в настоящее время является актуальной в связи с широким использованием этого способа эксплуатации скважин при добыче нефти, развитием эрлифтов для транспортировки пульпы, добычей полезных ископаемых с морского дна и др. Механизм действия систем газлифт не совсем понятен, так как он проходит в сложных условиях, при различных ориентациях трубы и большой длине, с переменными физическими свойствами фаз в изменяющихся режимах течения.

Цель работы: экспериментальное исследование структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе (режим газлифта) с применением лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком, измерение профилей скорости и концентрации газовой фазы в поперечном сечении трубы.

Методы исследования: лазерный доплеровский анемометр с волоконно-оптическим датчиком для измерения профилей скорости и концентрации газовой фазы в поперечном сечении трубы.

Результаты. Проведено исследование эффективности газлифта и структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком. В поперечном сечении газожидкостного потока можно выделить три характерных зоны. В отличие от пристенной зоны с минимальными значениями параметров, скорость и концентрация газовой фазы резко возрастают в переходной зоне, затем они плавно увеличиваются до максимума в центральной зоне трубы. Снарядный режим течения при газлифте является основным, жидкость поднимается в пробках между газовыми снарядами. Скорости верхней и нижней стенок снаряда одинаковы в центральной области трубы, но в переходной зоне скорость переднего фронта замедляется, а заднего, наоборот, ускоряется под действием стекающей пленки жидкости, образующей стенки снаряда. Скорость мелких пузырьков в пробках одинакова в центральной и переходной зонах.

Ключевые слова:

Газлифт, снарядный режим потока, большие пузыри, концентрация и скорость газовой фазы, лазерный доплеровский анемометр с волоконно-оптическим датчиком.

Введение

Проблема надежного проектирования газлифтных подъемников является в настоящее время весьма актуальной в связи с широким применением данного способа для добычи нефти, развитием эрлифтов для транспортировки пульпы, добычей полезных ископаемых с морского дна, для откачки воды в шахтах, для геотермальной энергетики и др. В эрлифтах сочетаются простота устройства, отсутствие движущихся частей, возможность содержания взвеси в транспортируемой жидкости и сжатый воздух в качестве источника энергии.

Большой вклад в исследование газожидкостных потоков, включая подъем жидкости в трубах восходящим потоком газа внесли в нашей стране: А.А. Арманд, Б.Г. Багдасаров, А.П. Крылов, С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович, В.Е. Накоряков, Н.Н. Константинов, В.И. Субботин, О.В. Клапчук, О.Н. Кашинский и др., а также зарубежные исследователи: G.K. Batchelor, A.E. Dukler, M.R. Davis, P. Griffith, R.A. Heringe, I. Kataoka, D.J. Niklin, Z.-S. Mao, F. Pickert, A. Serizawa, S.L. Soo, G.B. Wallis et al. [1–14]. Требования практического проектирования подъемников привели к появлению многочисленных методов расчета. В ведущих институтах ВТИ, ЦКТИ, ЭНИН, ВНИИГАЗ вышла большая серия работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям гидравлики паро- и газожид-

костных потоков. Итогом этого большого цикла исследований явилась разработка руководящих материалов для расчета нефтегазопроводов, котельных агрегатов и др. [15–19]. Результаты недавних исследований проблем газлифта представлены в работах [20–27]. Несмотря на широкое применение эрлифтов, универсальный аналитический расчет не создан из-за очень сложной связи между закономерностями движения двух–трех фазного потока в трубах, и свойствами перекачиваемых жидких объектов.

В [28–32] дан подробный обзор и анализ работ, посвященных исследованию снарядного режима газожидкостного потока и газлифтного подъемника, а также приведены результаты исследования структуры потока и его характеристик с применением электродиффузионного метода. Показано, что наличие большого числа параметров, определяющих характеристики газожидкостных потоков, приводит к невозможности их измерения для всех возможных случаев, встречающихся на практике. Отмечается, что чрезвычайная сложность процессов взаимодействия на границе фаз в двухфазном потоке приводит к необходимости создания методик расчета, учитывающих реальную внутреннюю структуру течения, получаемую в экспериментальных исследованиях.

В работе [28] проведено экспериментальное исследование структуры газожидкостного течения в

вертикальной трубе диаметром 15 мм и длиной 6000 мм в режиме газлифта. Было показано, что оптимальные режимы работы такого устройства не зависят от способа подачи газовой фазы и находятся в области снарядно-кольцевого режима. Жидкость транспортируется в пробках между газовыми снарядами со скоростью, равной приведенной скорости смеси. Это соответствует положительно значению касательного трения на боковой стенке трубы. Но существует интенсивное обратное течение, вызванное стеканием жидкой пленки, окружающей снаряд, которое соответствует отрицательному касательному напряжению трения на стенке трубы. Данная работа является продолжением экспериментального исследования структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе диаметром 16 мм и длиной 2700 мм в режиме газлифта.

Целью исследований являлось измерение с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком следующих величин: распределение интегральной скорости газовой фазы, скорости верхней и нижней границ снарядов в поперечном сечении трубы; распределение скорости пузырьков в жидких прослойках между снарядами; распределение локального газосодержания по сечению трубы; а также расхода транспортируемой жидкости в зависимости от расхода газа.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

По принципу действия газлифт относится к разностно-плотностному динамическому насосу, в котором для транспортировки воды используется энергия сжатого воздуха. Экспериментальное исследование структуры потока в вертикальной трубе в режиме газлифта с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком (ЛДВА) проводилось на установке, которая представляла замкнутый по жидкости циркуляционный контур. Блок-схема установки показана на рис. 1. Вода из бака-сепаратора – 4 направлялась по стояку сливной линии – 5 на смеситель – 1, установленный на входе в вертикальную рабочую часть – 2 (подъемную трубу), изготовленную из стеклянной трубки с внутренним диаметром 16 мм и длиной 2700 мм. Для создания двухфазного потока в смеситель поступал газ из магистрали (линия 6), который проходил через регулировочный вентиль – 7, расходомерную диафрагму – 8 и вдувался в смеситель через сопло диаметром 4 мм, здесь 9 и 10 – манометры для измерения дифференциального и статического давления, соответственно. Смеситель – 1 представлял собой сосуд диаметром около 120 мм, в который по оси была помещена трубка из оргстекла с внешним диаметром 40 мм. В трубке было просверлено 96 отверстий диаметром 0,5 мм для вдува газа. Подача жидкости осуществлялась через три штуцера, рас-

положенные в днище по периметру. Такая конструкция обеспечивала создание газожидкостной смеси с достаточно однородными пузырьками газа. Газожидкостная смесь, образованная в смесителе, поднималась по рабочей части и направлялась в бак – 4 для разделения жидкости и газа. Отработанный газ выходил в атмосферу, а жидкость поступала в мерную емкость для измерения расходной характеристики газлифта, затем в бак – 4.

Измерительный блок – 3 с волоконным световодом в качестве датчика был установлен на расстоянии 2200 мм от смесителя. Датчиком ЛДВА служил выходной торец многомодового кварцевого световода с размерами поперечного сечения (0,05/0,15/0,220 мм) и длиной около 7 м. Здесь указаны диаметры световедущего ядра, отражающей оболочки и вторичного защитного покрытия из эпоксиакрилата, соответственно. Дальний конец световода вводился в тонкую медицинскую иглу с внутренним диаметром 0,5 мм, которая закреплялась в тонкой трубке из нержавеющей стали, изогнутой под 90° навстречу потоку. Трубка закреплялась в координатном устройстве, с помощью которого датчик ЛДВА направлялся в исследуемую область газожидкостного потока. Погрешность измерения поперечной координаты составляла 0,05 мм. Световод в схеме измерения выполнял роль приемо-передающей антенны.

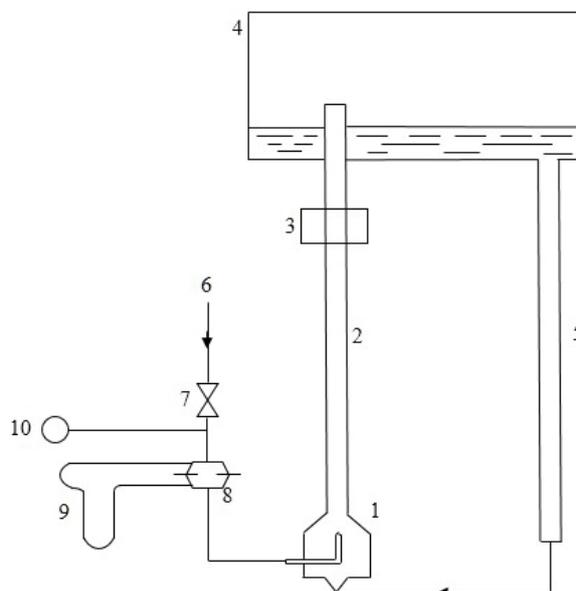


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – смеситель, 2 – рабочая часть, 3 – измерительный блок, 4 – бак-сепаратор, 5 – сливная линия, 6 – газовая линия, 7 – регулировочный вентиль, 8 – расходомерная диафрагма, 9 – дифференциальный манометр, 10 – манометр статического давления

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: 1 is the mixer, 2 is the test section, 3 is the measuring block, 4 is the separation tank, 5 is the drain line, 6 is the gas line, 7 is the control valve, 8 is the orifice plate, 9 is the differential pressure gauge, 10 is the static pressure gauge

Лазерный доплеровский анемометр с волоконно-оптическим датчиком

При исследовании локальных гидродинамических характеристик газожидкостных потоков преимуществами ЛДВА являются: возможность работы в потоках с малой оптической прозрачностью; с помощью длинного и обладающего большой гибкостью световода появляется возможность удалять объект исследования от прибора на расстояние порядка 100 м и более; возможность измерения пространственного распределения гидродинамических характеристик с достаточно высоким разрешением. Основным недостатком является контактность метода, что приводит к возмущению потока волоконно-оптическим зондом. Для уменьшения возмущений потока волоконно-оптический датчик применяют в миниатюрном исполнении диаметром 0,05–0,15 мм.

В ЛДВА скорости движения несущей среды и дисперсной фазы определяются по доплеровскому сдвигу частоты в свете, рассеянном движущимися частицами или пузырьками, как в обычных ЛДА. Эффект измерения скорости в оптически непрозрачном (в целом) потоке достигается путём ввода световода (или пучка световодов) в заданную область потока. Информация о скорости движения частиц берётся из области в непосредственной близости от торца световода. Блок-схема ЛДВА для измерения скорости и концентрации дисперсной фазы в газожидкостных потоках показана на рис. 2 [33, 34]. Луч гелий-неонового лазера I типа ЛГ-79-1 (мощность 15 мвт, длина волны излучения $\lambda=0,63$ мкм) проходит через отверстие в зеркале – 2, установленном под углом к направлению луча, и микрообъективом – 3 вводится в многомодовый световод – 4. Роль опорного пучка в схеме выполняет волна, отражённая от выходного торца световода, здесь 5 – наконечник волоконного датчика, который вводится в двухфазный поток. При подходе газового пузырька к торцу отражённый (рассеянный) им свет зондирующего излучения частично попадает обратно в световод. Совместно с опорной волной рассеянное (отраженное) пузырьком излучение проходит по световоду в обратном направлении и объективом – 3 направляется на наклонное зеркало, затем на поляризационный фильтр – 6, плоскость пропускания которого ортогональна плоскости поляризации луча лазера. При этом происходит разделение зондирующих и сигнальных пучков по поляризационному признаку. Линза – 7 направляет пучки через полевую диафрагму – 8 на фотоприёмник – 9. Поскольку оба пучка имеют высокую степень когерентности, их интерференция в плоскости фотоприёмника приводит к высокочастотной модуляции тока. Таким образом, рассматриваемая схема аналогична по принципу действия схеме с опорным пучком обычного ЛДА, работающего в режиме обратного рассеивания [35]. Электронная часть системы измерения содержит: фотоприёмник – 9, специальный логический блок – 10, блок – 11 для измерения

концентрации газовой фазы, и анализатор спектра – 12 для измерения скорости межфазных границ. Специальный логический блок – 10 служит для фильтрации и выделения различных межфазных границ в снарядном режиме газожидкостного потока (переднего или заднего фронта снаряда, пузырьков газа в пробках между снарядами).

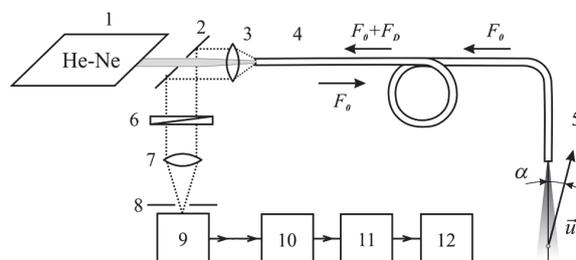


Рис. 2. Блок-схема лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком

Fig. 2. Block diagram of laser Doppler anemometer with fiber-optical probe

Связь между проекцией скорости межфазной поверхности на ось световода и измеряемой доплеровской частотой F_D определяется известным выражением

$$U \cos \alpha = F_D \lambda / 2n_f, \quad (1)$$

где $U \cos \alpha$ – проекция вектора скорости границы (или пузырька) на продольную ось световода, n_f – показатель преломления исследуемой среды. Из-за расходимости лазерного пучка на выходе из световода возникает систематическая погрешность в измерении скорости частицы, которая не превышает $\pm 5\%$ [36, 37]. В момент накалывания пузырька на наконечник световода происходит деформация межфазной поверхности и замедление скорости всплытия из-за интрузивной природы волоконного датчика. Датчик «видит» криволинейную отражающую поверхность в пределах своей апертуры ($NA=0,1$ и $0,2$ для одномодового и многомодового световодов), поэтому при углах между наконечником датчика и межфазной поверхностью больше апертуры световода доплеровские сигналы отсутствуют и измерение скорости пузырьков невозможно [38, 39].

Локальное газосодержание Φ в данной точке определяется как вероятность присутствия в данной точке газовой фазы, поэтому локальную объёмную концентрацию пузырьков можно измерять, как долю времени пребывания волоконного датчика в газовой среде ($\sum t_i$) относительно полного времени измерения T , согласно алгоритму

$$\Phi = (\sum t_i) / T, \quad (2)$$

где t_i – время нахождения волоконного датчика в пузырьке. При смене жидкой и газовой фазы, в которую погружался торец световода в газожидкостном потоке, на выходе фотоприёмного устройства возникал импульс фототока почти прямоугольной формы, связанный с изменением коэффициента отражения от его торца при пересечении

межфазных границ ($n_f=1$ – воздух, $n_f=1,33$ – вода). Зависимость формы импульса фототока от угла накаливания на световод исследована в [38, 39]. Необходимый уровень порога компаратора определялся при калибровке волоконного датчика и сравнении его показаний с эталонным датчиком проводимости в газожидкостном потоке в вертикальной трубе [36, 40].

Результаты исследований

Работа газлифта в пузырьковом режиме не приводила к подъему и выносу жидкости из рабочего участка. На рабочих режимах происходило достаточно быстрое слияние пузырьков с образованием снарядного режима течения, который сохранялся во всем диапазоне расходных параметров. Визуальные наблюдения показали, что распределение пузырей по размерам не сохранялось по высоте рабочей части. Помимо процесса слияния пузырей с образованием снарядов, происходило (частично) их дробление в моменты нисходящего движения жидкости. В результате в выходном участке трубы имел место снарядный режим течения, в котором пробки жидкости между снарядами содержали большое количество пузырьков, вся смесь поднималась вверх.

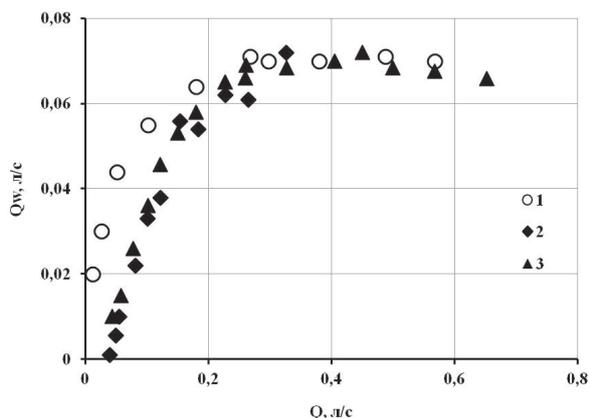


Рис. 3. Зависимость расхода жидкости при газлифте от расхода газа

Fig. 3. Dependence of liquid flow rate at gas lift on gas flow rate

На рис. 3 показано, что количество лифтируемой жидкости (Q_w) увеличивается с ростом расхода газа Q (приведенного к нормальным условиям) до оптимальной величины, после которой происходит ее уменьшение. При этом длина газовых снарядов увеличивается, и растет загазованность жидких пробок. Максимальная эффективность газлифта соответствует области перехода к снарядно-кольцевому режиму течения. Для сравнения на графике представлены результаты (точки 2, 3) по эффективности газлифта в трубе диаметром 15 мм и длиной 6000 мм [24]. При расходах газа больше 0,2 л/с эффективность газлифта в обоих случаях одинакова. Их различие при малых расходах газа объясняется, по-видимому, разной высотой столба жидкости над местом ввода газа (глубиной погру-

жения). Как показано в [24], лифтирование жидкости происходит в жидких перемычках между снарядами, но существует и интенсивное обратное течение, вызванное гравитационным стеканием жидкой пленки, окружающей снаряд.

Профили скорости газовой фазы

Измерение скорости газовой фазы проведены лазерным доплеровским анемометром с волоконно-оптическим датчиком. Доплеровский сдвиг частоты высокочастотного сигнала измерялся на анализаторе спектра. В каждой точке газожидкостного потока набиралась статистика значений скорости порядка 130 измерений. Среднее значение скорости определялось как математическое ожидание от статистического ансамбля. Следует отметить трудности при разделении электронных сигналов от различных межфазных границ в газожидкостном потоке. Поэтому измерения скорости газовой фазы проведены в два этапа. На первом этапе проведены интегральные измерения без дифференциации поверхностной раздела газовой фазы. На втором этапе измерения проводились с применением специального электронного логического блока, который позволял выделить передний или задний фронт снарядов газожидкостного потока, пузырьки в пробках и перемычки внутри тела снаряда.

На рис. 4 приведена зависимость интегральной скорости газовой фазы на оси трубы (U_0) от расхода газа. В пузырьковом режиме при малых расходах газа (до $Q \sim 0,02$ л/с) скорость пузырьков на оси трубы почти не изменяется и составляет $\sim 0,42$ м/с. Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к росту U_0 до максимума, при оптимальном режиме газлифта ее скорость составляет 1,41 м/с. Увеличение скорости U_0 коррелирует с ростом концентрации газа на оси трубы.

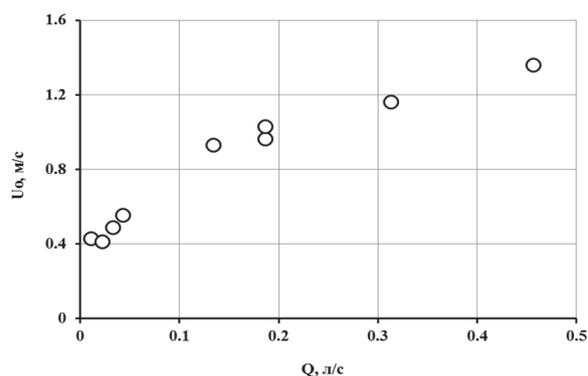


Рис. 4. Зависимость интегральной скорости газовой фазы на оси трубы от расхода газа

Fig. 4. Dependence of integral velocity of the gas phase on the tube axis on the gas flow rate

На рис. 5 показаны профили интегральной скорости газовой фазы при оптимальном режиме газлифта ($Q=0,45$ л/с), в области снарядного режима при $Q=0,045$ л/с, и при пузырьковом режиме

($Q=0,0035$ л/с). По оси абсцисс отложено относительное расстояние r/R от стенки трубы, где $R=8$ мм – радиус трубы. В пузырьковом режиме их скорость в центральной области трубы практически постоянна и составляет $0,4$ м/с. В пристенной области ($r/R < 0,2$) наблюдается уменьшение их скорости до $\sim 0,3$ м/с под влиянием стенки трубы. При снарядном режиме интегральная скорость газовой фазы имеет максимум ($U=0,655$ м/с) при $r/R=0,37$, на оси трубы $U_0=0,54$ м/с, а в пристенной области $U=0,49$ м/с.

При оптимальном режиме газлифта профиль скорости газовой фазы имеет особенность при $r/R=0,1$, что, по-видимому, связано со знакопеременной скоростью жидкой фазы в этой области и гравитационным стеканием пленки жидкости, окружающей снаряды ($U=0,99$ м/с). В центральной области потока скорость плавно увеличивается до $U_0=1,41$ м/с.

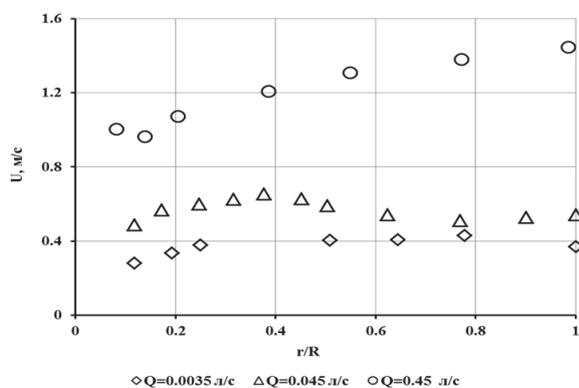


Рис. 5. Профили скорости газовой фазы при пузырьковом режиме ($Q=0,0035$ л/с), снарядном режиме ($Q=0,045$ л/с) и оптимальном газлифте ($Q=0,45$ л/с)

Fig. 5. Gas phase velocity profiles for the bubble flow ($Q=0,0035$ l/s), slug flow ($Q=0,045$ l/s), and optimal gas lift ($Q=0,45$ l/s)

На втором этапе проведено разделение сигналов от межфазных границ разного рода с помощью специального логического модуля, в алгоритме применялись характерные признаки для выделения заданного высокочастотного сигнала. На рис. 6 показаны профили скорости различных межфазных границ для снарядного режима газлифта при $Q=0,045$ л/с. Для сравнения на графике показан профиль интегральных скоростей газовой фазы (точки 4). Скорость малых пузырьков в прослойках жидкости между снарядами практически постоянна по сечению трубы и составляет $0,3$ м/с. Передняя и задняя границы снаряда имеют постоянную скорость в центральной области потока ($U \sim 0,5$ м/с) до $r/R=0,4$. В переходной зоне скорость переднего фронта замедляется, а заднего, наоборот, ускоряется под действием стекающей пленки жидкости, образующей стенки снаряда. Таким образом, в центральной области трубы скорости всех межфазных границ, за исключением мелких пузырьков, одинаковы.

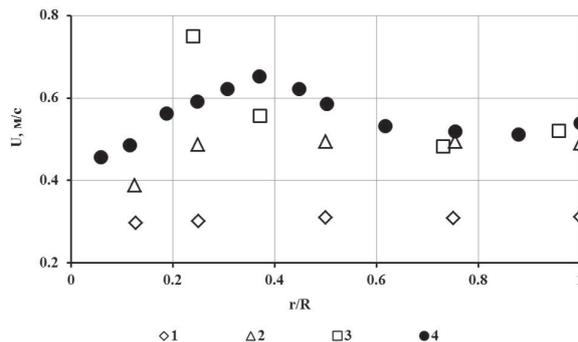


Рис. 6. Профили скорости различных межфазных границ для снарядного режима потока ($Q=0,045$ л/с): 1 – пузырьки в пробках, 2 – передний фронт снаряда, 3 – задний фронт снаряда, 4 – интегральная скорость газовой фазы

Fig. 6. Velocity profiles of different interphase boundaries for a slug flow ($Q=0,045$ l/s): 1 are the bubbles in a plug, 2 is the front border of a slug, 3 is the bottom border of a slug, 4 is the integral velocity of the gas phase

Профили локальной концентрации газовой фазы

На рис. 7 показана зависимость газосодержания на оси трубы Φ_0 от расхода газа. В начальный период при увеличении расхода газа Q до $0,1$ л/с наблюдается быстрый рост концентрации до $\sim 0,60$. При дальнейшем увеличении расхода до $0,5$ л/с концентрация газа на оси трубы монотонно растет до $0,83$. Для сравнения на графике показаны результаты измерения концентрации газа на оси трубы методом электропроводности (точки 2) в трубе диаметром 15 мм и длиной 6000 мм [24]. Очевидно, что измерения концентрации газа двумя методами показали одинаковые результаты. Следует отметить, что непрерывное увеличение концентрации при больших расходах газа соответствует относительному снижению эффективности газлифта.

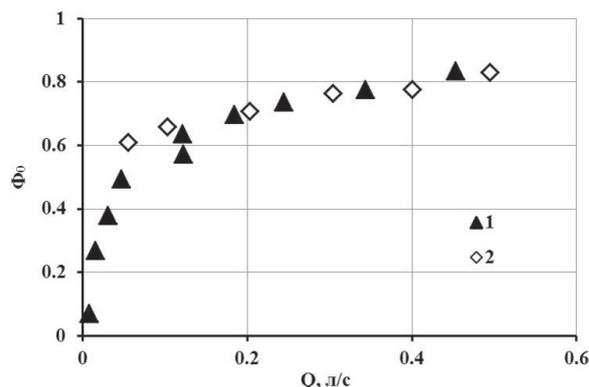


Рис. 7. Концентрация на оси трубы (Φ_0) в зависимости от расхода газа: 1) $l=2700$ мм, $d=16$ мм; 2) $l=6000$ мм, $d=15$ мм

Fig. 7. Concentration on the tube axis (Φ_0) depending on gas flow rate: 1) $l=2700$ mm, $d=16$ mm; 2) $l=6000$ mm, $d=15$ mm

На рис. 8 приведены профили локальной концентрации при различных расходах газа, соответ-

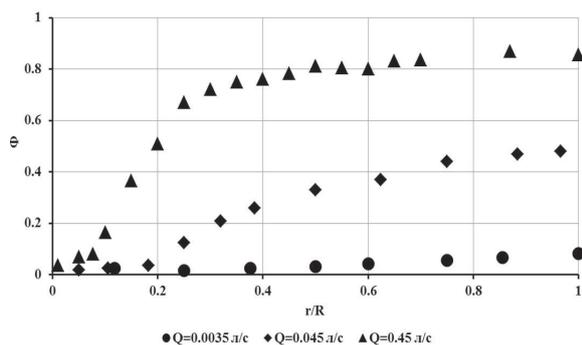


Рис. 8. Профили локальной концентрации газа при различных режимах газлифта: ● – пузырьковый, ◆ – снарядный, ▲ – оптимальный

Fig. 8. Profiles of local gas concentration for different regime of the gas lift: ● is the bubble regime, ◆ is the slug regime, ▲ is the optimal gas lift

ствующих пузырьковому (0,0035 л/с), снарядному (0,045 л/с) и началу дисперсно-кольцевого режима течения в трубе (0,45 л/с). Можно выделить три характерные зоны. В области непосредственной близости от стенки ($r/R < 0.1$) концентрация газа минимальна и при оптимальном газлифте составляет 0,05. Это область знакопеременного течения, в которой жидкая перемычка между снарядами движется вверх, а гравитационная пленка, образующая стенки снаряда, стекает вниз. В центральной области ($r/R = 0,3–1,0$) для всех трех режимов течения концентрация газа плавно увеличивается к центру трубы. Максимальная концентрация газа на оси составляет: 0,08 – для пузырь-

кового режима, 0,49 – для снарядного режима, 0,83 – для оптимального режима газлифта. В переходной области между пристенной и центральной зонами концентрация газа резко увеличивается.

Заключение

Проведено исследование эффективности газлифта и структуры газожидкостного потока в вертикальной трубе с помощью лазерного доплеровского анемометра с волоконно-оптическим датчиком. Показано, что максимальная эффективность газлифта соответствует в основном области перехода к снарядно-кольцевому режиму течения.

В поперечном сечении газожидкостного потока можно выделить три характерных зоны: центральную, пристенную и переходную между ними. В отличие от пристенной зоны с минимальными значениями параметров, скорость и концентрация газовой фазы резко возрастают в переходной зоне, затем они плавно увеличиваются до максимума в центральной зоне трубы.

Снарядный режим течения при газлифте является основным, жидкость поднимается в пробках между газовыми снарядами. Скорости верхней и нижней стенок снаряда одинаковы в центральной области трубы, но в переходной зоне скорость переднего фронта замедляется, а заднего, наоборот, ускоряется под действием стекающей пленки жидкости, образующей стенки снаряда. Скорость мелких пузырьков в пробках одинакова в центральной и переходной зонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 14–19–01685, ведущий ученый – Маркович Д.М.) через ИТ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багдасаров В.Г. Теория, расчет и практика эргазлифта / под ред. И.Г. Есьмана. – М.; Л.: Гостоптехиздат, 1947. – 371 с.
- Арманд А.А., Невструева Е.И. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Изв. ВТИ. – 1950. – № 2. – С. 1–8.
- Бэтчелор Дж.К. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 758 с.
- Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
- Гриффитс П., Уоллис Г. Двухфазное снарядное течение // Теплопередача. – 1961. – Т. 83. – № 3. – С. 99–114.
- Pickert F. The theory of air-lift pump // Engineering. – 1932. – V. 134. – P. 19–20.
- Крылов А.П. Потери трения и скольжения при движении жидкости и газа по вертикальным трубам // Нефтяное хозяйство. – 1935. – № 8. – С. 35–42.
- Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F. Two-phase flow in vertical tubes // Trans. Inst. Chem. Eng. – 1962. – V. 40. – № 1. – P. 61–68.
- Coy C.J. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
- Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow // Int. J. Multiphase Flow. – 1975. – V. 2. – P. 235–246.
- Herringe R.A., Davis M.R. Structural development of gas-liquid mixture flows // Journal Fluid Mech. – 1976. – V. 73. – P. 97–123.
- Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small diameter vertical pipe // Int. J. Multiphase Flow. – 1986. – V. 12. – № 3. – P. 337–355.
- Похвалов Ю.Е., Субботин В.И. Статистические параметры снарядного двухфазного течения // Теплоэнергетика. – 1988. – № 2. – С. 28–33.
- Mao Z.-S., Dukler A.E. An experimental study of gas-liquid slug flow // Experiments in Fluids. – 1989. – V. 8. – P. 169–182.
- Константинов Н.Н. Гидравлика двухфазного потока и ее применение к расчетам эрлифтов, гидравлических затворов и циркуляции в вертикально-водотрубных паровых котлах // Исследование и применение нефтепродуктов / под ред. Н.Г. Пучкова. – Л.: Гостоптехиздат, 1950. – С. 260–297.
- Методы и результаты экспериментального исследования закономерностей движения газо-нефтяной смеси в условиях реальной фонтанной скважины / Д. Аузбаев, А.И. Башкиров, Ю.Н. Васильев, Р.А. Максудов // Нефтяное хозяйство. – 1961. – № 12. – С. 38–40.
- Движение газожидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев, Г.Э. Одишария, О.В. Клапчук, А.А. Точигин, Н.И. Семенов. – М.: Недра, 1978. – 270 с.
- Энциклопедия Эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко. – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
- Stifeev F. Research of the regimes of air-lift use to lift the pulp of high density // Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2014. – V. 107. – № 3. – P. 89–95.

20. Ebrahimi A., Khomehchi E. Developing a novel workflow for natural gas lift optimization using advanced support vector machine // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 28. – P. 626–638.
21. Hanafizadeh P., Raffiee A.H., Saidi M.H. Experimental investigation of characteristic curve for gas-lift pump // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2014. – V. 116. – P. 19–27.
22. Assessment of total oil production in gas-lift process of wells using Box–Behnken design of experiments in comparison with traditional approach / M. Behjoomanesh, M. Keyhani, E. Ganjiazad, M. Izadmehr, S. Riahi // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – V. 27 (3). – P. 1455–1461.
23. Shao W., Boiko I., Al-Durra A. Plastic bag model of the artificial gas lift system for slug flow analysis // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 33. – P. 573–586.
24. Customization of an optical probe device and validation of a signal processing procedure to study gas-liquid-solid flows. Application to a three-phase internal-loop gas-lift Bioreactor / A. Mota, A. Ferreira, A.A. Vicente, P. Sechet, J.M.F. Martins, J.A. Teixeira, A. Cartellier // *Chemical Engineering Science*. – 2015. – V. 138. – P. 814–826.
25. Mahdiani M.R., Khomehchi E. Stabilizing gas lift optimization with different amounts of available lift gas // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – V. 26. – P. 18–27.
26. Drandev S., Penev K.I., Karamanov D. Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor // *Chemical Engineering Science*. – 2016. – V. 146. – P. 180–188.
27. Modeling of flow splitting for production optimization in offshore gas-lifted oil fields: Simulation validation and applications / T.L. Silva, E., Camponogara A.F. Teixeira, S. Sunjerga // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – V. 128. – P. 86–97.
28. Кашинский О.Н., Горелик Р.С., Козьменко Б.К. Экспериментальное исследование модели газлифтного подъемника для наклонно-направленных скважин // ВИНТИ, № 01830063199: отчет НГУ. – Новосибирск, 1983. – 75 с. (промежуточный).
29. Экспериментальное исследование модели газлифтного подъемника для наклонно-направленных скважин / А.Р. Евсеев, О.Н. Кашинский, С.А. Тачков, Л.С. Тимкин // ВИНТИ, № 01830036722: отчет НГУ. – Новосибирск, 1984. – 78 с. (заключительный).
30. Кашинский О.Н. Локальные гидродинамические характеристики двухфазных газожидкостных потоков: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Новосибирск, 1994. – 331 с.
31. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Рандин В.В. Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2006. – Т. 13. – № 3. – С. 411–416.
32. Kashinsky O.N., Randin V.V., Chinak A.V. Heat transfer and shear stress in gas-liquid flow in an inclined flat channel // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2014. – V. 23. – Iss. 1. – P. 39–46.
33. Лазерный доплеровский измеритель скорости непрозрачных потоков жидкости и частиц / В.Н., Лисицин В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.П. Чеботаев // *Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Труды III Всесоюз. совещания*. – Новосибирск, 1980. – С. 41–46.
34. Евсеев А.Р. Лазерный доплеровский измеритель скорости со световодом // *Автометрия*. – 1982. – № 3. – С. 109–111.
35. Дубинцев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
36. Измерение структурных характеристик газожидкостного потока лазерным анемометром с волоконным световодом / А.Р. Евсеев, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаяев, С.А. Тачков, Л.С. Тимкин // *Автометрия*. – 1987. – № 2. – С. 69–73.
37. Тачков С.А. ЛДИС с оптиковолоконным зондом для измерения скорости в газожидкостном потоке // *Газожидкостные течения: Сборник научных трудов / под ред. В.Г. Гасенко, М.С. Искакова*. – Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1990. – С. 91–102.
38. Евсеев А.Р. Экспериментальное исследование локальной структуры турбулентных двухфазных потоков с высокой концентрацией дисперсной фазы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2013. – 299 с.
39. Bubble velocity, diameter, and void fraction measurements in a multiphase flow using fiber optic reflectometer / H-J. Lim, K-An. Chang, Ch.B. Su, Chi-Y. Chen // *Rev. Sci. Instrum.* – 2008. – V. 79. – P. 125105 (1–11).
40. Optical fiber probe to measure local void fraction profiles / D. Morris, A. Teysseidou, J. Lapierre, A. Tapucu // *Appl. Optics*. – 1987. – V. 26 (21). – P. 4660–4664.

Поступила 24.10.2016 г.

Информация об авторах

Евсеев А.Р., доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 532.529.5

EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW IN VERTICAL TUBE IN GAS LIFT MODE**Aleksey R. Evseev,**

evseev@itp.nsc.ru; evseev_ar39@mail.ru

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

Relevance. The problem of robust design of gas lift is now very important in connection with the widespread use of this method for oil production, development of airlifts to transport pulp, mineral extraction from the seabed and other applications. The action mechanism of gas lift systems is not entirely clear, since it is held under complex conditions, at different orientations of pipe and long lengths, with variable physical properties of the phases in the changing flow regimes.

The main aim of the study is the experimental investigation of gas-liquid flow in vertical tube (gas lift regime), using a laser Doppler anemometer with optical fiber probe, measurement of velocity and concentration profiles in the tube cross section.

The research methods: Laser Doppler anemometer with optical fiber probe to measure velocity and concentration profiles of a gas phase in the tube cross section.

The results. The author has studied the efficiency of gas lift and gas-liquid flow structure in a vertical pipe employing a laser Doppler anemometer with fiber-optical probe. Three specific zones can be distinguished in the cross section of the gas-liquid flow. In contrast to the wall area with minimum values of the parameters, the velocity and concentration of the gas phase in the transition zone are increasing sharply, further they are increasing smoothly to a maximum in the central zone. The gas lift is characterized mainly by slug regime, the liquid rises in the plugs between the large bubbles. Velocity of the large bubbles top and bottom borders in the central zone of tube is the same, but in the transition zone the velocity of the top border slows down, while at the bottom border, on the contrary, it is accelerated by falling liquid film. The velocity of small bubbles in the center and transition zones is the same.

Key words:

Gas lift, slug regime of flow, large bubbles, concentration and velocity of gas phase, laser Doppler anemometer with optical fiber probe.

This research was financially supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 14–19–01685, supervised by Prof. Markovich D.M.).

REFERENCES

1. Bagdasarov V.G. *Teoriya, raschet i praktika gazlifta* [Theory, calculation and practice of gas lift]. Ed. by I.G. Esmann. Moscow; Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1947. 371 p.
2. Armand A.A., Nevstrueva E.I. Issledovanie mekhanizma dvizheniya dvukhfaznoy smesi v vertikalnoy trube [Investigation of the mechanism of a two-phase mixture movement in a vertical tube]. *Izv. VTI*, 1950, no. 2, pp. 1–8.
3. Batchelor G.K. *Vvedenie v dinamiku zhidkosti* [Introduction to fluid dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1973. 758 p.
4. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energy, 1976. 296 p.
5. Griffiths P., Wallis G. Dvukhfaznoe snaryadnoe techenie [Two-phase slug flow]. *Teploperedacha*, 1961, vol. 83, no. 3, pp. 99–114.
6. Pickert F. The theory of air-lift pump. *Engineering*, 1932, vol. 134, pp. 19–20.
7. Krylov A.P. Poteri treniya i skolzheniya pri dvizhenii zhidkosti i gaza po vertikalnym trubam [Losses of friction and slip at fluid and gas motion through a vertical pipe]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1935, no. 8, pp. 35–42.
8. Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F. Two-phase flow in vertical tubes. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1962, vol. 40, no. 1, pp. 61–68.
9. Soo S.L. *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem* [Fluid dynamics of multiphase systems]. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.
10. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 1975, vol. 2, pp. 235–246.
11. Herringe R.A., Davis M.R. Structural development of gas-liquid mixture flows. *Journal Fluid Mech*, 1976, vol. 73, pp. 97–123.
12. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small diameter vertical pipe. *Int. J. Multiphase Flow*, 1986, vol. 12, no. 3, pp. 337–355.
13. Pokhvalov Yu.E., Subbotin V.I. Statisticheskie parametry snaryadnogo dvukhfaznogo techeniya [Statistical parameters of slug two-phase flow]. *Teploenergetika*, 1988, no. 2, pp. 28–33.
14. Mao Z.-S., Dukler A.E. An experimental study of gas-liquid slug flow. *Experiments in Fluids*, 1989, vol. 8, pp. 169–182.
15. Konstantinov N.N. Gidravlika dvukhfaznogo potoka i ee primeneniye k rashchetam erliftov, gidravlicheskiy zatvorov i tsirkulyazii v vertikalno-vodotrubnykh parovykh kotlakh [Hydraulic two-phase flow and its application for calculation of airlifts, hydraulic gates and circulation in vertical tube steam boilers]. *Issledovanie i primeneniye nefteproduktov* [Investigation and application of oil products]. Ed. by N.G. Puchkov. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1950. pp. 260–297.
16. Auzbaev D., Bashkirov A.I., Vasilev Yu.N., Maksutov R.A. Metody i rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya zakonomernostey dvizheniya gaso-neftyanoy smesi v usloviyakh realnoy fontanoy skvazhiny [Methods and results of the experimental study of motion laws of gas-oil mixture in a real flow of the fountain bore]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1961, no. 12, pp. 38–40.
17. Mamaev V.A., Odishariya G.E., Klapchuk O.V., Tochigin A.A., Semenov N.I. *Dvizhenie gasozhidkostnykh smesey v trubakh* [Movement of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 270 p.
18. Papayani F.A., Kozyryatsky L.N., Pashchenko V.S., Kononenko A.P. *Entsiklopediya Erliftov* [Encyclopedia of airlifts]. Moscow, Informsvyazizdat Publ., 1995. 592 p.
19. Stifeev F. Research of the regimes of air-lift use to lift the pulp of high density. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2014, vol. 107, no. 3, pp. 89–95.

20. Ebrahimi A., Khamehchi E. Developing a novel workflow for natural gas lift optimization using advanced support vector machine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 28, pp. 626–638.
21. Hanafizadeh P., Raffiee A.H., Saidi M.H. Experimental investigation of characteristic curve for gas-lift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 116, pp. 19–27.
22. Behjoomanesh M., Keyhani M., Ganji-azad E., Izadmehr M., Riahi S. Assessment of total oil production in gas-lift process of wells using Box–Behnken design of experiments in comparison with traditional approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 27 (3), pp. 1455–1461.
23. Shao W., Boiko I., Al-Durra A. Plastic bag model of the artificial gas lift system for slug flow analysis. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 33, pp. 573–586.
24. Mota A., Ferreira A., Vicente A.A., Sechet P., Martins J.M.F., Teixeira J.A., Cartellier A. Customization of an optical probe device and validation of a signal processing procedure to study gas–liquid–solid flows. Application to a three-phase internal-loop gas-lift Bioreactor. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 138, pp. 814–826.
25. Mahdiani M.R., Khamehchi E. Stabilizing gas lift optimization with different amounts of available lift gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 18–27.
26. Drandev S., Penev K.I., Karamanev D. Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor. *Chemical Engineering Science*, 2016, vol. 146, pp. 180–188.
27. Silva T.L., Camponogara E., Teixeira A.F., Sunjerga S. Modeling of flow splitting for production optimization in offshore gas-lifted oil fields: Simulation validation and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 86–97.
28. Kashinsky O.N., Gorelik R.S., Kozmenko B.K. *Ekspiermentalnoe issledovanie modeli gazliftnogo podemnika dlya naklonno-napravlennykh skvazhin* [Experimental study of gas lift model for directional wells]. VINITI no. 01830063199: otchet NGU. Novosibirsk, 1983. 75 p.
29. Evseev A.R., Kashinsky O.N., Tachkov S.A., Timkin L.S. *Ekspiermentalnoe issledovanie modeli gazliftnogo podemnika dlya naklonno-napravlennykh skvazhin* [Experimental study of gas-lift model for directional wells]. VINITI no. 01830036722: NGU. Novosibirsk, 1984. 75 p.
30. Kashinsky O.N. *Lokalnye gidrodinamicheskie kharakteristiki dvukhfaznykh gasozhidkostnykh potokov*. Dis. Dokt. nauk [Local hydrodynamic parameters of gas-liquid two-phase flows. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1994. 331 p.
31. Kashinsky O.N., Kurdymov A.S., Randin V.V. Trenie na stenke v voskhodyashchem snaryadnom techenii v vertikalnoy trube [Friction at the wall in upstream slug flow in a vertical tube]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 3, pp. 411–416.
32. Kashinsky O.N., Randin V.V., Chinak A.V. Heat transfer and shear stress in gas–liquid flow in an inclined flat channel. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, vol. 23, Iss. 1, pp. 39–46.
33. Lisitsyn V.N., Orlov V.A., Fomin Yu.N., Chebotaev V.P. Lazerny doplerovskiy izmeritel skorosti neprozrachnykh potokov zhidkosti i chastits [Laser Doppler velocimeter for opaque flows of liquid and particles]. *Trudy III Vsesoyuznogo Soveshchaniya: Ekspiermentalnye metody i apparatura dlya issledovaniya turbulentnosti* [Proc III All-Union Meeting. Experimental techniques and equipment for studying turbulence]. Novosibirsk, 1980. pp. 41–46.
34. Evseev A.R. Lazerny doplerovskiy izmeritel skorosti so svetovodom [Laser Doppler anemometer with fiber]. *Avtometriya*, 1982, no. 3, pp. 109–111.
35. Dubnistchev Yu.N., Rinkyavichus B.S. *Metody lazernoy doplerovskoy anemometrii* [Methods of laser Doppler anemometry]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 304 p.
36. Evseev A.R., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Tachkov S.A., Timkin L.S. Izmerenie strukturnykh kharakteristik gasozhidkostnogo potoka lazernym anemometrom s volokonnym svetovodom [Measurement of structural characteristics of gas-liquid flow by a laser anemometer with optical fibers]. *Avtometriya*, 1987, no. 2, pp. 69–73.
37. Tachkov S.A. LDIS s optikovolokonnym zondom dlya izmereniya skorosti v gasozhidkostnom potoke [LDIS with fiber optic probe for measuring the velocity in the gas-liquid flow]. *Gazozhidkostnye techeniya. Sbornik nauchnykh trudov* [Gas-liquid flows]. Eds. V.G. Gasenko, M.S. Iskakov. Novosibirsk, SO AN SSSR, 1990. pp. 91–102.
38. Evseev A.R. *Ekspiermentalnoe issledovanie lokalnoy struktury turbulentnykh dvukhfaznykh potokov s vysokoy kontsentratsiey dispersnoy fazy*. Dis. Dokt. nauk [Experimental study of the local structure of turbulent two-phase flow with a high concentration of the dispersed phase. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2013. 299 p.
39. Lim H-J., Chang K-An., Su Ch.B., Chen Chi-Y. Bubble velocity, diameter, and void fraction measurements in a multiphase flow using fiber optic reflectometer. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, vol. 79, pp. 125105 (1–11).
40. Morris D., Teyssedou A., Lapierre J., Tapucu A. Optical fiber probe to measure local void fraction profiles. *Appl. Optics.*, 1987, vol. 26 (21), pp. 4660–4664.

Received: 24 October 2016.

Information about the authors

Aleksey R. Evseev, Dr. Sc., leading researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 504.55.054:622(470.6)

К ПРОБЛЕМАМ КОНВЕРСИИ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович¹,
yiri1963@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич³,
lukyanov@tpu.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 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность проблемы обеспечения промышленности металлами для удовлетворения нужд населения повышается в условиях радикальных изменений в системе хозяйствования и продолжающегося ухудшения условий разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом.

Цель работы: обоснование целесообразности организационно-экономических и производственно-технологических мероприятий по переходу горной отрасли на инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом.

Методы исследования включают в себя анализ мирового опыта и литературных публикаций, получение и обработку данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа, полупромышленные испытания вариантов альтернативных технологий.

Результаты. Определено, что направления конверсии горного производства включают в себя применение твердеющих смесей для закладки выработанного пространства и выщелачивание металлов из руд. Показано, что природоохранный концепт технологического перевооружения состоит в перенесении процессов переработки основного объема руд в подземные условия; эффективность утилизации хвостов обогащения складывается из снижения величины ущерба от хранения хвостов, стоимости полученных при переработке металлов и неметаллов, сырья для строительной индустрии и попутной товарной продукции. Целесообразность освоения конверсионных технологий определяется соотношением компенсационных затрат и ущерба от хранения отходов, производственной мощности утилизирующего предприятия и его технологического уровня. Отмечено, что диверсификация горного производства на подземную разработку месторождений в близкой перспективе требует корректировки инженерного обеспечения горных работ по горным специальностям. Производственная деятельность горных инженеров связана с эффективностью использования природных ресурсов, поэтому горному инженеру надо быть технологом-переработчиком, гидрогеологом, экологом и т. д. Конверсия технологий реализуется при условии: эффективность добычи руд определяется с учетом ценности извлекаемых и не извлекаемых металлов, а также с учетом величины действительного ущерба окружающей среде.

Выводы: восстановление потенциала горной отрасли зависит от реализации инновационных технологий при условии надлежащего обеспечения специалистами нового поколения.

Ключевые слова:

Конверсия, технология разработки, руда, твердеющая смесь, выщелачивание, металл, горный инженер, эффективность.

Введение

В результате реформы системы хозяйствования 90-х гг. многие горнодобывающие и перерабатывающие предприятия России оказались в состоянии кризиса, причинами которого считают истощение запасов кондиционного сырья, старение технологий и оборудования, изменение структуры связей регионов с центром и т. п.

Главной же причиной кризиса является прекращение государственного дотирования ранее убыточных предприятий, которое привело к сокращению или полному прекращению добычи руды на большинстве из них [1].

Технологической причиной неблагополучия минерально-ресурсного комплекса является преобладание методов экстенсивного недропользова-

ния. Это видно из того, что разработка месторождений сопровождается увеличением объемов не отвечающих конъюнктуре запасов руд и хвостов переработки руд на поверхности. В обоих случаях это: потерянные металлы и омертвленные на подготовку к добыче запасы средства. На сегодняшний день в недрах месторождений теряется абсолютное большинство потенциально извлекаемых металлов.

Стало очевидным, что дальнейшее существование предприятий невозможно без применения нетрадиционных технологий [2]. Для некоторых предприятий – это освоение технологий, повышающих качество сырья до уровня конкурентоспособности, с закладкой выработанного пространства. Для большинства предприятий – это расши-

рение сырьевой базы за счет вовлечения в производство запасов, считающихся некондиционными для традиционной технологии.

Подавляющее большинство предприятий России располагает достаточными запасами руд и развитой инфраструктурой, чтобы осуществить конверсию производства и освоить менее затратные технологии производства металлов. Увеличив объем добычи руды и выпуска металлов за счет привлеченного некондиционного сырья, они могут уменьшить себестоимость конечной продукции не на проценты, а в разы.

Целью работ, посвященных предстоящему переводу большей части горного производства на подземную разработку месторождений, является обоснование нового подхода к обеспечению производства специалистами.

Результаты и обсуждение

Обоснование конверсии технологий добычи руд формирует проблему федерального и глобального значения. Разработка экономических аспектов освоения инновационных технологий включает в себя обоснование организационно-экономических и производственно-технологических мер (рис. 1).

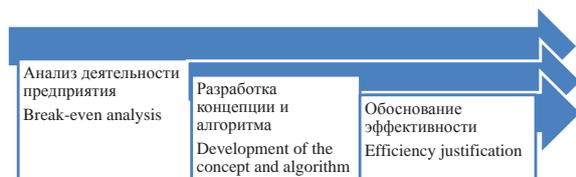


Рис. 1. Аспекты конверсии горного производства на инновационные технологии

Fig. 1. Aspects of mining industry conversion to innovative technologies

Поставленная цель достигается в ходе комплексных исследований, включающих анализ мирового опыта, литературных публикаций, лабораторные исследования с обработкой данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа, полупромышленные испытания вариантов альтернативных технологий.

Осуществляемое по стратегическим и иным причинам государственное дотирование планово-убыточных предприятий не стимулировало их к освоению прогрессивных технологий второй половины прошлого века: закладка пустот твердеющими смесями и выщелачивание металлов из руд, а также гидрометаллургические методы переработки руд [3].

Технологии с выщелачиванием из руд цветных, благородных и редких металлов имеют широкие перспективы применения в горном производстве (рис. 2) [3–7].

Горное производство обладает значительной капиталоемкостью, использует дорогостоящее оборудование и характеризуется высокой трудоемкостью и повышенным уровнем риска при изменении условий разработки месторождений.



Рис. 2. Варианты технологий с выщелачиванием металлов из руд

Fig. 2. Options of technologies with metals leaching from ores

Природоохранный концепт конверсионных технологий состоит в перенесении процессов первичной переработки основного объема руд в подземные условия. Богатые руды выдаются на поверхность и перерабатываются на металлургическом заводе, а средние и бедные, соответственно, – в подземных блоках рудников и штабелях на территории рудников (рис. 3) [8].

Анализ состояния проблемы обеспечения сырьем показывает, что в настоящее время приоритетное значение приобретает комплексное освоение полезных ископаемых и повторная разработка техногенных месторождений [9–11].

Результаты использования хвостов переработки металлических руд сводятся к следующему: при переработке хвостов образуется до 80 % кварцосодержащего материала, пригодного для использования в различных отраслях; остальная часть представляет собой продукт, из которого возможно извлечение металлов.

Хвосты обогащения слагают массивы, отличающиеся специфическими признаками строения и подверженные изменениям в процессе переработки и хранения. Применительно к горной промышленности утилизация хвостов заключается в получении вяжущих и инертных заполнителей для изготовления, прежде всего, твердеющих смесей.

Особенность хвостов обогащения состоит в том, что их использование без извлечения металлов недопустимо из соображений экономики и охраны труда [12].

Условие экономической эффективности извлечения металлов из хвостов:

$$P_y > Y_c + Z_n,$$

где P_y – прибыль при утилизации хвостов; Y_c – ущерб окружающей среде в денежном выражении; Z_n – затраты на переработку хвостов.

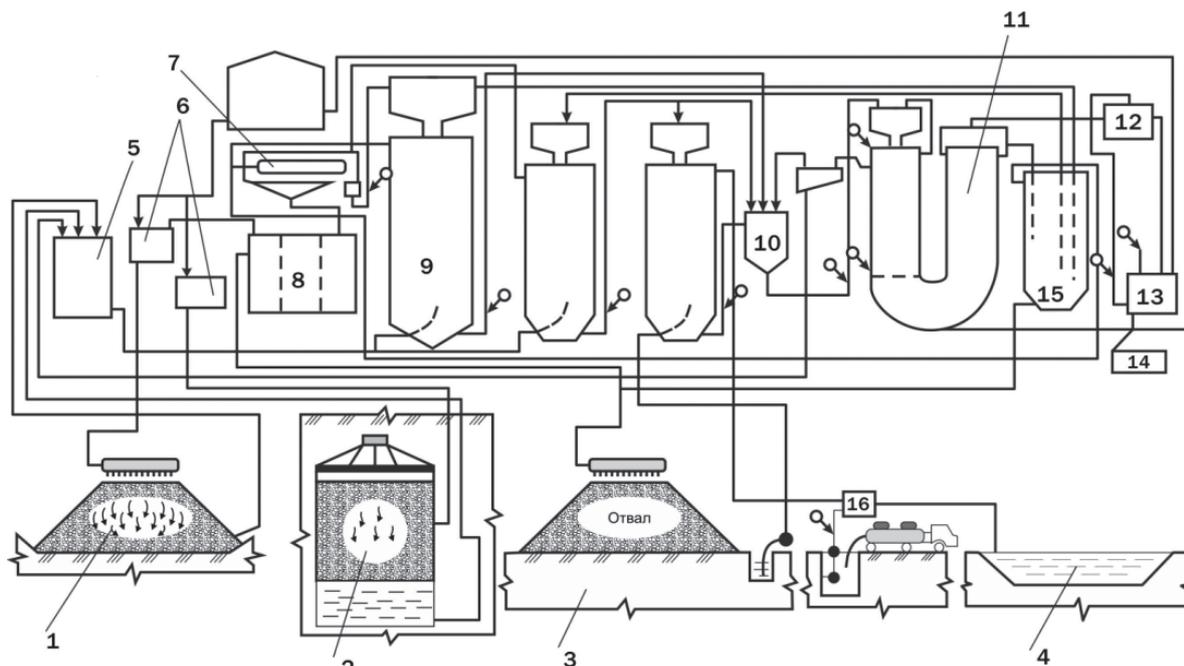


Рис. 3. Комплекс выщелачивания металлов: 1– штабель кучного выщелачивания; 2 – блок подземного выщелачивания; 3 – отвал; 4 – пруд; 5–8 – емкости; 9, 10 – технологические аппараты; 11– сорбционно-десорбционная колонна; 12–16 – вспомогательное оборудование

Fig. 3. Complex of metal leaching: 1 is the heap leaching stack; 2 is the underground leaching block; 3 is the dump; 4 is the pond; 5–8 are the capacities; 9, 10 are the devices; 11 is the sorption and stripping column; 12–16 is the service equipment

Природо- и ресурсосберегающая концепция обращения с отходами переработки заключается в том, что для предотвращения нанесения ущерба человеку, флоре и фауне следует не консервировать, а утилизировать хвосты. Основное препятствие для этого – наличие металлов в хвостах – преодолевается с помощью инновационной технологии выщелачивания в дезинтеграторе: без активации в дезинтеграторе, с предварительной активацией в дезинтеграторе и с последующим выщелачиванием и с одновременной активацией и выщелачиванием в дезинтеграторе [13] (рис. 4).

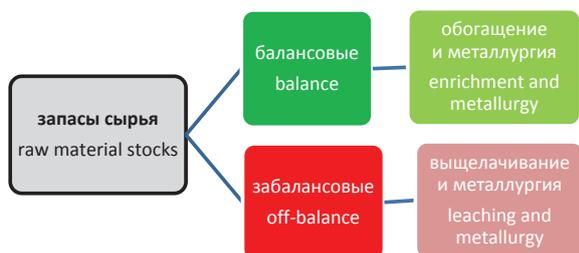


Рис. 4. Технологическая схема извлечения металлов из хвостов обогащения

Fig. 4. Technological scheme of metals extraction from enrichment tails

Эффективность утилизации хвостов обогащения складывается из снижения величины ущерба от хранения хвостов, стоимости полученных при переработке металлов и неметаллов, сырья для строительной индустрии и попутной товарной продукции [14–17].

При утилизации хвостов в составе бетонных смесей экономический эффект создается за счет экономии и цемента, и инертных материалов. Прочность активированных смесей корректируется добавкой цемента (рис. 5).

Хвосты обогащения включают мелкую фракцию – вяжущие (0, 076 мм), и более крупную фракцию – инертный заполнитель. Примерный состав смеси с хвостовым и товарным цементным вяжущим представлен в таблице.

Таблица. Соотношение компонентов твердеющих смесей
Table. Ratio of hardening mixtures components

Расход компонентов, кг/м ³ Consumption of components, kg/m ³				Прочность закладки, МПа Filling strength, MPa	
цемент cement	вяжущие хвосты binding tails	вода water	инертные хвосты inert tails	Время твердения, дни Curing time of, days	
				28	90
–	270	380	1370	0,13	0,17
	–		1620	0,16	0,28
30	130		1490	0,36	0,60
	270		1370	0,56	0,78
	300		1340	0,60	0,82
60	130		1460	0,46	0,68
	190		1410	0,54	0,84
	220		1380	0,58	0,88
	250		1350	0,66	0,93
	300		1300	0,76	0,96
80	–		1455	0,42	0,66

Эквивалент активности при подготовке хвостов в дезинтеграторе или соотношение хвостов и це-



Рис. 5. Технологическая схема изготовления бетонных изделий

Fig. 5. Technological scheme of production of concrete products

мента в составе комплексного вяжущего варьируется в интервале 8–20. При одинаковой прочности расход цемента на 1 м³ твердеющей смеси снижается с 140 до 80 кг. Из 220 кг хвостов, расходуемых на приготовление 1 м³ твердеющей смеси, при активации в дезинтеграторе в качестве активного вяжущего используется 90 кг (40 %), а остальные 130 кг хвостов – как инертный заполнитель.

Массовая концентрация вяжущего компонента:

$$A = \Pi_m + \Pi_n / K_a,$$

где A – массовая концентрация сложного вяжущего, кг/м³; Π_m – расход цемента для активации процесса, кг/м³; Π_n – массовая концентрация исходных хвостов, кг/м³; K_a – коэффициент активации хвостов в установках, доли ед.

Эколого-экономическая эффективность определяется соотношением компенсационных затрат и ущерба от хранения отходов, производственной мощности утилизирующего предприятия и его технологического уровня [18, 19]:

$$\Pi = \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{ (M_{ey} \Pi_{my} + Q_y \Pi_{qy}) \} - \\ - \sum_{a=1}^3 [K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x] - \\ - [(M_e \Pi_m + Q \Pi_q) + \\ + Q_r \Pi_r] K_c K_y K_t K_o K_p K_{sp} K_{ch} \rightarrow \max,$$

где P – продукты утилизации хвостов; O – виды хвостов; Π – процессы переработки хвостов; T – время переработки; F – фазы существования хранилищ; N – стадия использования хвостов; M_{ey} – количество металлов из отходов; Π_{my} – цена металлов; Q_y – количество восстановленных эффектов; Π_{qy} – цена утилизированных веществ; E_q – коэффициент процентной ставки на кредит для утилизации; E_x – коэффициент процентной ставки на кредит для производства металлов; E_{ny} – коэффициент процентной ставки на экологию; M_e – количество потерянных металлов; Π_m – цена потерянных металлов; Q – количество потерянных эффектов; Π_q – цена потерянных полезных веществ; Q_r – количество эффектов поражения среды; Π_r – затраты на

компенсацию глобальных факторов поражения; Z – затраты на управление; K – затраты на управление хранилищами; K_c – коэффициент самоорганизации хвостов; K_y – коэффициент утечки продуктов выщелачивания; K_t – коэффициент дальности утечки растворов; K_o – коэффициент влияния на биосферу; K_p – коэффициент влияния загрязнения на соседние регионы; K_{sp} – коэффициент реализации опасности со временем; K_r – коэффициент риска поражения окружающей среды от неучтенных факторов.

Сегодняшнее горное предприятие представляет собой систему с большим количеством проходческих и очистных забоев, пунктов выпуска и погрузки, транспортных средств, средств подъема, вентиляции, водоотлива, рудного склада, сортировочной установки, обогатительной фабрики и т. п., усложненную изменчивостью параметров рудных месторождений и качества сырья. Для освоения инновационных технологий получаемых по старым программам знаний недостаточно.

Диверсификация горного производства на подземную разработку месторождений требует корректировки инженерного обеспечения горных работ по направлениям: «Прикладная геология», «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика», «Геоэкология» в рамках направления подготовки горняков, геологов, обогатителей, маркшейдеров, геофизиков и т. п. [20].

Курс горного образования обогатился новыми разделами фундаментальных наук: информатика, электроника и т. п. В систему образования вошли средства с математическим обеспечением, банком программ, языками программирования и доступом в мировую сеть. Использование информационных технологий развивается по направлениям:

- применение машинных методов контроля знаний;
- версификация вариантов учебных заданий;
- разработка расчётов и программ на машинных языках;
- разработка имитационных обучающих комплексов.

Необходимость корректировки горного образования подтверждается тем, что условия разработки месторождений полезных ископаемых ухудшаются, спрос на продукцию горного производства удовлетворять будет все труднее, несмотря на вовлечение в эксплуатацию новых месторождений. Запасов месторождений с комфортными условиями эксплуатации уже недостаточно, поэтому будут осваиваться ранее непривлекательные участки действующих рудников, месторождения со сложными горно-геологическими условиями, некондиционные руды, что сопряжено с ухудшением качества сырья, удорожанием продукции, повышением опасности работ и усилением нагрузки на окружающую среду.

Горному инженеру без специальных знаний решать проблемы конверсии трудно. Ему надо быть не только горным технологом, но и технологом-переработчиком, гидрогеологом, экологом и т. д.

Производственная деятельность горных инженеров связана с эффективностью использования природных ресурсов, а результаты деятельности влияют на состояние окружающей человека среды. Образование по вопросам охраны окружающей среды от негативного влияния горных работ должно занимать приоритетное место в учебных программах подготовки специалистов горного профиля.

Принципиальное отличие специализированных на новые технологии горных инженеров буду-

щего от выпускаемых сейчас заключается в максимальном учете последних достижений науки и производства в области природо- и ресурсосбережения, в том числе: сохранность земной поверхности и глубокая утилизация хвостов переработки руд.

Заключение

Восстановление потенциала горных отраслей депрессивных регионов в условиях увеличивающейся конкуренции на рынке металлов зависит от успеха конверсии инновационных природо- и ресурсосберегающих технологий.

Конверсия технологий может быть успешной при обязательном условии: эффективность добычи руд определяется с учетом ценности извлекаемых и не извлекаемых металлов, а также с учетом действительного ущерба окружающей среде. Основным критерием эффективности технологий должна быть стоимость реализации продукта за вычетом стоимости извлеченного из недр сырья и стоимости рекреации окружающей среды и добытчиков полезных ископаемых.

При прогрессирующей тенденции ухудшения условий разработки месторождений и необходимости увеличения объема производства металлов конверсия технологий требует корректировки подготовки горных инженеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров И.В., Савон Д.Ю., Стоянова И.А. Эколого-экономические последствия реструктуризации угольной промышленности Восточного Донбасса и пути их решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 5. – С. 67–74.
2. Белова А.Г., Корнилов С.В. О технологической платформе «Твердые полезные ископаемые» // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 45–52.
3. Гендлер С.Г. Обеспечение комплексной безопасности и при освоении минерально-сырьевых и пространственных ресурсов недр // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 105–110.
4. Лизункин В.М., Лизункин М.В., Бейдин А.В. Подземные геотехнологии подземной разработки рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 78–85.
5. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. – 2015. – V. 157. – P. 306–324.
6. Авдеев П.Б., Овешников Ю.М. Опыт применения кучного выщелачивания на рудных карьерах Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 123–128.
7. Святецкий В.С., Литвиненко В.Г., Морозов А.А. О возможности и условиях применения блочного подземного выщелачивания урановых руд Стрельцовского месторождения // Горный журнал. – 2012. – № 10. – С. 77–82.
8. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental Study of Non-Waste Recycling Tailings Ferruginous Quartzite // Research India Publications. – 2015. – № 15. – P. 35410–35416.

9. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes / Bian Zhengfu, Miao Xiexing, Shaogang Lei, Chen Shen-en, Wang Wenfeng, Struthers Sue // Science. – 2012. – V. 337. – № 6095. – P. 702–703.
10. Davies M.P., Rice S. An alternative to conventional tailing management – «dry stack» filtered tailings // Proc. of the Eighth International Conference on Tailings and Mine Waste. – Fort Collins, Colorado, 16–19 January 2001. – US: Balkema, 2001. – P. 411–422.
11. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes / D.M. Franks, D.V. Boger, C.M. Côte, D.R. Mulligan // Resources Policy. – 2011. – V. 36. – № 2. – P. 114–122.
12. Golik V.I., Komashchenko V.I., Razorenov Yu. I. Activation of technogenic resources in disintegrator // Mine Planning and Equipment Selection: Proc. of the 22nd MPES Conference / Eds. C. Drebenstedt, R. Singhal. – Freiberg, 2013. – P. 1101–1106.
13. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 3. – P. 38–41.
14. Packey D.J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // Resour. Policy. – 2012. – V. 37. – № 1. – P. 104–108.
15. Reck B.K., Graedel T.E. Challenges in metal recycling // Science. – 2012. – V. 337. – № 6095. – P. 690–695.
16. Маслеников С.А. Обоснование рациональных параметров комбинированной чугуно-бетонной крепи вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 4. – P. 210–214.
17. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Флотация техногенного вольфрамолибденового сырья при утилизации песков хвостохранилища Тырнаузской обогатительной фабрики // Горный журнал. – 2015. – № 8. – P. 92–97.

18. Golik V.I., Hasheva Z.M., Economical Efficiency of Utilization of Allied Mining Enterprises Waste // The Social Sciences. – 2015. – № 10 (5). – P. 682–686.
19. Техничко-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля / А.А. Морозов, А.П. Смагин, Г.Ф. Безносков, А.Н. Юртаев // Горный журнал. – 2013. – № 8–2. – P. 123–128.
20. Полухин О.Н., Волков Ю.И. Подготовка горных инженеров в Белгородском государственном национальном исследовательском университете // Горный журнал. – 2012. – № 9. – P. 29–37.

Поступила 21.11.2016 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.

Разоренов Ю.И., доктор технических наук, профессор, ректор Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Лукьянов В.Г., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

ON THE ISSUE OF CONVERSION OF METAL DEPOSIT DEVELOPMENT TECHNIQUES

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Yury I. Razorenov¹,
yiri1963@mail.ru

Victor G. Lukyanov³,
lukyanov@tpu.ru

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

² Geophysical Institute of the Vladikavkaz Russian Academy of Sciences Scientific Center,
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, RSO-Alania, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of providing industry with metals for supplying the needs of population increases in radical changes in the economic system and continuous deterioration of conditions for exploring mineral deposits using the underground method.

The aim of the research is to substantiate the appropriateness of organizational-economic and production-technological measures to convert mining industry to innovative techniques in mineral deposits exploration by the underground method.

Research methods include the analysis of international experience and literature, obtaining and processing data based on multiple regression and correlation analysis, pilot plant testing of alternative technologies.

Results. It was ascertained that the directions of mining industry conversion include application of solid mixtures for laying-out space and leaching of metals from ores. It is shown that the environmental concept of technological upgrading consists in transferring the processing of the main volume of ores into underground conditions; the efficiency of utilization of tailings consists in reducing the level of damage from tailings, the value of metals and non-metals obtained in processing, raw materials for construction industry and associated commercial products. The feasibility of development of conversion technologies is determined by the ratio of the compensation of costs and damages from waste storage, production capacity of the disposal enterprise and its technological level. Diversification of mining production to underground mining of deposits in near-term perspective requires the correction in engineering support of mining on mountain specialties. Production activities of mining engineers is related to the efficient use of resources, therefore, a mining engineer should be a technologist and processor, hydrogeologist, ecologist, etc. Conversion of technologies is implemented, provided that: the efficiency of ore extraction is based on the value of recoverable and not recoverable metals, and taking into account the effective quantity of damage to the environment.

Conclusions: restoration of mining industry potential depends on implementation of innovative technologies, provided adequate engineers of the new generation.

Key words:

Conversion, development technique, ore, hardening mixture, leaching, metal, mining engineer, efficiency.

REFERENCES

- Petrov I.V., Savon D.Yu., Stoyanova I.A. Environmental and economic impacts of coal industry restructuring eastern Donbass and solutions. *Mining informational and analytical bulletin*, 2014, no. 5, pp. 67–74. In Rus.
- Belova A.G., Kornilkov S.V. On technological platform «Solid Minerals». *Gornyi Zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 45–52. In Rus.
- Gendler S.G. Ensuring complex safety when exploring mineral and raw material and spatial resources of subsoil. *Gornyi Zhurnal*, 2014, no. 5, pp. 105–110. In Rus.
- Lizunkin V.M., Lizunkin M.V., Beydin A.V. Underground geotechnologies of developing ore deposits. *Mining informational and analytical bulletin*, 2015, no. 1, pp. 78–85. In Rus.
- Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 306–324.
- Avdeev P.B., Oveshnikov Yu.M. Experience of on heap leach ore mines Transbaikalia. *Mining informational and analytical bulletin*, 2014, no. 4, pp. 123–128. In Rus.
- Svyatetsky V.S., Litvinenko V.G., Morozov A.A. On opportunities and conditions of applying block underground leaching of uranium ores of the Streltsovsky field. *Gornyi Zhurnal*, 2012, no. 10, pp. 77–82. In Rus.
- Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental Study of Non-Waste Recycling Tailings Ferruginous Quartzite. *Research India Publications*, 2015, no. 15, pp. 35410–35416.
- Bian Zhengfu, Miao Xiexing, Shaogang Lei, Chen Shen-en, Wang Wenfeng, Struthers Sue. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*, 2012, no. 6095, pp. 702–703.
- Davies M.P., Rice S. An alternative to conventional tailing management – «dry stack» filtered tailings. *Proc. of the Eighth International Conference on Tailings and Mine Waste*. Fort Collins, Colorado, 2001, US, Balkema, 2001. P. 411–422.
- Franks D.M., Boger D.V., Côte C.M., Mulligan D.R. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resources Policy*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 114–122.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Razorenov Yu.I. Activation of technogenic resources in desintegrator. *Mine Planning and Equipment Selection. Proc. of the 22nd MPES Conference*. Eds. Carsten Drebenstedt, Raj Singhal. Freiberg, 2013, pp. 1101–1106.

13. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metalurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 38–41.
14. Packey D. J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resour. Policy*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 104–108.
15. Reck B. K., Graedel T. E. Challenges in metal recycling. *Science*, 2012, vol. 337, no. 6095, pp. 690–695.
16. Maslennikov S.A. The justification of the rational parameters of the combined cast-iron and concrete vertical well bore supports. *Mining informational and analytical bulletin*, 2009, no. 4, pp. 210–214. In Rus.
17. Evdokimov S. I., Evdokimov V. S. Flotation of technogenic tungsten-molybdenum raw materials when utilizing sands of the tailing dump of Tyrnyauzsk concentrating factory. *Gornyi Zhurnal*, 2015, no. 8, pp. 92–97. In Rus.
18. Golik V. I., Hasheva Z. M., Economical Efficiency of Utilization of Allied Mining Enterprises Waste. *The Social Sciences*, 2015, no. 10 (5), pp. 682–686.
19. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., Yurtaev A.N. Technical and economic efficiency evaluation of block underground leaching of uranium from poor ores of the Streltsovsky ore field. *Gornyi Zhurnal*, 2013, no. 8–2, pp. 123–128. In Rus.
20. Polukhin O.N., Volkov Yu.I. Training of mining engineers at the Belgorod State National Research University. *Gornyi Zhurnal*, 2012, no. 9, pp. 29–37. In Rus.

Received: 21 November 2016.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, professor, North Caucasian State Technological University; chief researcher, Geophysical Institute of the Vladikavkaz Russian Academy of Sciences Scientific Center.

Yury I. Razorenov, Dr. Sc., professor, rector, North Caucasian State Technological University.

Victor G. Lukyanov, Dr. Sc., professor, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.982.2

АГРЕГИРОВАНИЕ И КОАГУЛЯЦИЯ АСФАЛЬТЕНОВ В ПЛЕНКЕ НЕФТИ: ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Коржов Юрий Владимирович¹,
ykor1962@mail.ru

Орлов Сергей Анатольевич²,
yunitov@mail.ru

¹ Югорский государственный университет,
Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

² АНО «Югорский центр нанотехнологий»,
Россия, 628007, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 45.

Актуальность работы обусловлена практической значимостью изучения процессов агрегирования асфальтенов пленочной нефти и определения размерных параметров микро- и наноструктур осажденных частиц. Проводимые ранее исследования по осаждению асфальтенов из растворов нефти в *n*-гексане не были связаны с изучением таких объектов, как «пленочная нефть – пары *n*-гексана». В связи с этим самостоятельный научный интерес представляют исследования по разработке методов визуализации процессов коагуляции и осаждения асфальтенов в пленках нефти.

Цель работы: получить данные о процессе агрегирования асфальтенов пленочной нефти на поверхности твердого тела в условиях дестабилизирующего воздействия паров *n*-гексана; изучить морфологию и определить размерные параметры осажденных асфальтенов.

Методы исследования. Для регистрации быстротекущих процессов на поверхности пленок нефти в парах *n*-алкана применялась микровидеосъемка. Визуализация процесса коагуляции и осаждения асфальтенов в пленках нефти осуществлялась с помощью цифровой оптической микроскопии. Морфология и структурные параметры осажденных асфальтенов определялись методом атомно-силовой микроскопии.

Результаты и выводы. Установлено, что в системе «пленка нефти – пары *n*-гексана» стадии агрегирования асфальтенов предшествуют процессы локальной деформации поверхности пленки в местах адсорбции и проникновения в нефтяную фазу насыщенных паров *n*-гексана. Характерное движение микрочастиц асфальтенов в пленке нефти, фиксируемое методом цифровой оптической микроскопии, объясняется циркулирующим движением дисперсной среды. Методом атомно-силовой микроскопии определены размерные параметры структуры осажденных асфальтенов. Показана возможность применения метода атомно-силовой микроскопии для визуализации смол и масел в адсорбированном состоянии. Результаты исследования показывают, что процесс осаждения асфальтенов нефти на поверхности твердого тела идет в неравновесных условиях. Данная работа может быть использована для развития комплексной методики изучения процессов агрегирования и коагуляции асфальтенов в пленках нефти с использованием цифровой оптической микроскопии и микровидеосъемки, для исследования морфологии осажденных наноструктур асфальтенов с помощью атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова:

Асфальтены, пленочная нефть, нефтяная дисперсная система, агрегация, коагуляция и осаждение асфальтенов, поверхностное натяжение, оптическая микроскопия, атомно-силовая микроскопия.

Введение

Современные технологии разработки месторождений нефти достаточно часто формируют условия, при которых асфальтены нефти теряют устойчивость, агрегируют и осаждаются в виде твердой фазы. Установлено, что дестабилизация нефтяной дисперсной системы в объеме пласта возникает из-за изменения температуры и давления, концентрации растворенного газа, действия реагентов. Изменяя пластовые условия, можно попытаться управлять процессами структурообразования в нефтяной системе, воздействуя на характер взаимодействия между парафинами, смолами и асфальтенами.

Для выделения асфальтенов из нефти чаще всего используют их способность осаждаться из нефтяной системы при добавлении низкомолекулярных *n*-алканов. С применением этих углеводородных растворителей проводится изучение условий агрегативной (седиментационной) устойчивости асфальтенов нефтей с основной целью – повышение

эффективности технологий извлечения остаточной нефти. Предполагается, что процесс агрегирования асфальтенов в пленках нефти и образование отложений на твердой поверхности происходит сходным образом в природных условиях и в лабораторной ячейке, поэтому результаты лабораторных экспериментов отражают особенности процессов, протекающих в пластах.

К настоящему времени молекулярное и надмолекулярное строение асфальтенов нефтей изучено разными физическими и физико-химическими методами [1–4]. Из современных методов исследования агрегативной и кинетической устойчивости асфальтенов нефти следует отметить методы атомно-силовой и оптической микроскопии. Новым научным успехом является получение изображений более чем ста отдельных молекул асфальтенов методами атомно-силовой и туннельной сканирующей микроскопии [5]. Анализ изображений позволил уточнить важный вопрос, касающийся моле-

кулярного строения асфальтенов, так как ранее считалось, что они представляют собой либо «острова» из полициклических фрагментов с алкильными заместителями, либо «архипелаги», в которых «острова» связаны между собой углеводородными цепочками. По данным атомно-силовой и туннельной микроскопии, было установлено, что большинство молекул асфальтенов относятся к «островному» типу, с небольшим включением «архипелагов» [5].

В данной работе методом цифровой оптической микроскопии проведено наблюдение за поверхностью пленки нефти при поглощении ею паров н-гексана. В результате наблюдения установлена интенсивность и длительность этого взаимодействия. Визуализирован процесс агрегации и коагуляции асфальтенов. Для изучения морфологии, адсорбированных на твердой поверхности асфальтенов, смол и масляных фракций применялась атомно-силовая сканирующая микроскопия (АСМ). Данный подход позволил установить, что адсорбционное равновесие для смол и асфальтенов достигается в разные промежутки времени, так как наблюдалось последовательное образование обособленных концентрационных зон из осажденных асфальтенов, смол и масел на ровной поверхности подложки кварца.

Теоретические основы

Дисперсные свойства нефти проявляются благодаря асфальтенам, определяемым как фракция, не растворимая в легких алканах C_5 – C_9 , и смолам – фракции деасфальтенизированной нефти, склонной к сильной адсорбции на поверхностно-активных материалах [6–16]. Исходя из молекулярного строения, между асфальтенами и смолами сырых нефтей трудно провести четкую границу – различия имеют не столько качественный, сколько количественный характер. Общепринята многоблочная модель макромолекул смол и асфальтенов

[10–12, 16], согласно которой макромолекулы состоят из отдельных структурных блоков, включающих полициклические (~4–20 циклов) [5, 12], частично ароматизированные, ядра и алкильные цепи и мостики, имеющие сульфидные, эфирные и другие группы (рис. 1, а). Большинство молекул в маслах обычно содержат одну такую структурную единицу, в смолах – до трех и в асфальтенах – до пяти единиц (рис. 1, б). Часть таких полиароматических структурных блоков пространственно организованы в более крупные макрочастицы [3, 5, 10, 13, 14, 16], состоящие в среднем из 5 слоистых частиц (рис. 1, с).

В рамках модели, предложенной в 1961 г. Т.Ф. Йеном [13], с применением атомно-силовой сканирующей микроскопии, масс-спектрометрии, флуоресцентных методов и рентгеновской дифракции при изучении молекулярной диффузии установлено, что размеры молекул (рис. 1, а) нефтяных асфальтенов достигают 10–50 Å, включая алкильные цепи длиной до 20 Å [5, 16], смолисто-асфальтеновые «пачечные» структуры в сырых нефтях имеют диаметр того же порядка (до 40–50 Å), включая по 4–6 молекулярных слоев [3, 15], по краям которых располагаются преимущественно короткие насыщенные группы C_1 – C_5 , но присутствуют также линейные и разветвленные цепи до C_{20} и более [11, 14]. Данные образования в нефти принято называть *наноагрегаты* (рис. 1, б). При высокой концентрации они способны объединяться в кластеры или *агрегаты* (рис. 1, с), образуя в нефти вязкоупругую сетку. Узлы в сетке – агрегаты – включают до 8 наноагрегатов, без перекрывания, но с возможным взаимодействием алкановых цепей [3, 16]. Вязкоупругая сетка асфальтенов устойчива в нефти, пока сохраняется определенная плотность сольватных оболочек из смол вокруг наноагрегатов, которая зависит, в определенных пределах, от температуры, давления и растворяющей способности среды.

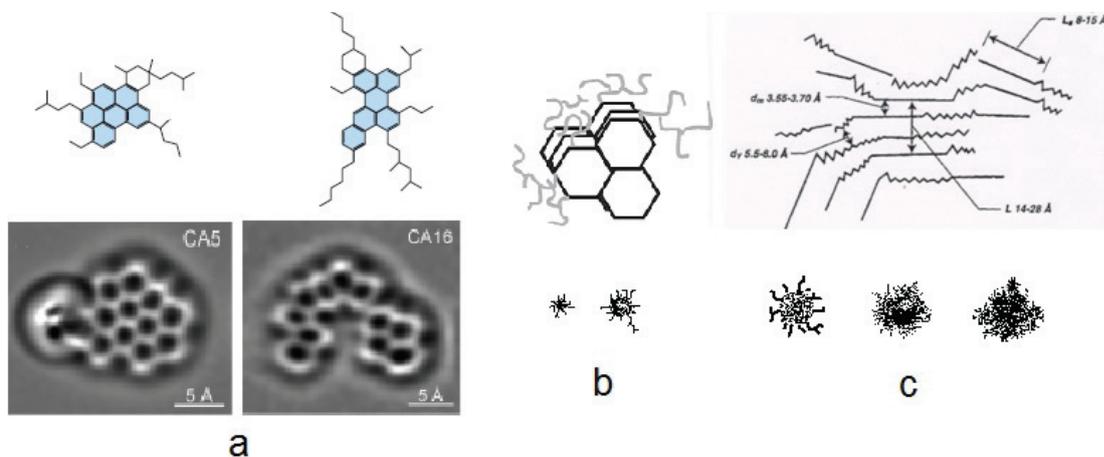


Рис. 1. Гипотетические структуры и фактические изображения молекул асфальтенов, полученных методом атомно-силовой микроскопии (а) [5], наноагрегаты (б) и агрегаты (с) нефтяных асфальтенов [3, 13]

Fig. 1. Hypothetical structures and real images of asphaltene molecules obtained with the atomic force microscopy (AFM) (a) [5], nanoaggregates (b) and the aggregates (c) of oil asphaltenes [3, 13]

Смолы и асфальтены это склонные к ассоциации и адсорбции молекулы. Фактически они формируют полярную дисперсную систему нефти, в которой смолы, с одной стороны, имеют тенденцию к образованию ассоциатов с асфальтенами и окружают их в виде сольватных оболочек, а с другой – хорошо растворяются в легких углеводородах, обеспечивая стабильность дисперсного раствора.

Энергетическое состояние нефтяной коллоидной системы наиболее адекватно моделируется на основании первичных принципов рассмотрения молекулярных систем, основанных на учете составляющих энергии Гельмгольца в условиях разработки пласта (постоянство порового объема) и энергии Гиббса для ненарушенного пласта (постоянство давления). Однако они не дают надежно прогнозирования осаждения асфальтенов из-за отсутствия единого мнения о строении и молекулярной массе асфальтенов, размере частиц и ряде связанных с этим параметров системы (поверхностное натяжение на границе асфальтен–нефть, асфальтен–порода, количество адсорбированных слоев асфальтенов на поверхности породы и др.). Но после появления новейших работ Лео Гросса и Оливера Маллинса в области исследования строения молекул асфальтенов и их свойств [5] такая возможность появляется.

Для нефти в условиях пласта, при постоянстве пластового давления, свободная энергия Гиббса (ΔG) асфальтенов выражается как сумма составляющих свободной энергии системы. Количество и форма представления энергетических составляющих может различаться в зависимости от задач моделирования и порядка их влияния на систему.

Для *гомогенной* коллоидной системы обычно используют уравнение (1), включающее два потенциала, учитывающее термодинамическое состояние системы ($\Delta G_{\text{энтр}}$ и $\Delta G_{\text{давл}}$) и потенциал растворимости ($\Delta G_{\text{раств}}$) молекул:

$$\Delta G = \Delta G_{\text{энтр}} + \Delta G_{\text{давл}} + \Delta G_{\text{раств}} = -S\Delta T + V\Delta P + n_m \cdot n_A (\delta_A - \delta_m)^2, \quad (1)$$

где n_m и n_A – число молей мальтенов и асфальтенов в объеме (для простоты понимания под мальтенами подразумевают всю нефтяную систему за вычетом асфальтенов, то есть это взаиморастворенные углеводороды, гетероатомные компоненты и смолы, создающие растворяющую асфальтены нефтяную матрицу), а δ_A и δ_m – параметры растворимости асфальтенов и мальтенов, характеризующие плотность энергии когезии, учитывающие дисперсионное, полярное и водородное взаимодействие [16, 17].

В стационарных пластовых условиях основным фактором давления ($\Delta G_{\text{давл}}$) является гравитация в различных частях пласта, а энтропийный фактор ($\Delta G_{\text{энтр}}$) выражает тепловое движение частиц, уравнение (1) приобретает вид (2) [3, 16]:

$$\Delta G = kT(n_m \cdot \ln \varphi_m + n_A \cdot \ln \varphi_A) + V\Delta \rho g h + n_m \cdot n_A (\delta_A - \delta_m)^2, \quad (2)$$

где φ_m и φ_A – мольные объемы мальтенов и асфальтенов, соответственно; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $\Delta \rho g h$ – плавучесть асфальтеновых частиц в объеме V , где $\Delta \rho$ – разность плотности между асфальтенами и нефтяной фазой.

Для *неравновесного* состояния, возникающего в результате технологического воздействия на пласт, когда в коллоидную систему вводятся новые компоненты, изменяется внутренняя электростатическая активность и в уравнении состояния Гиббса (3) требуется учитывать гетерогенность системы и вводить силовую составляющую вклада поверхностных сил новых образующихся фаз (например, асфальтенового осадка):

$$\Delta G = kT(n_m \cdot \ln \varphi_m + n_A \cdot \ln \varphi_A) + kT \ln(C_A(h_0)/C_A(h_i)) + \sigma \Delta A + n_m \cdot n_A (\delta_A - \delta_{mm})^2, \quad (3)$$

где $C_A(h_0)$ и $C_A(h_i)$ – концентрация асфальтеновых частиц на различных уровнях h пласта; σ – поверхностное натяжение фазовых границ; A – площадь межфазной поверхности.

Учитывая, что асфальтены могут находиться в нефти в различных формах (молекулы, наноагрегаты, агрегаты, кристаллический или аморфный осадок), в тех или иных случаях на систему будут оказывать воздействие одни факторы и являться условно нулевыми другие. Достигнутая в настоящее время обобщенная концепция рассмотрения нефтяной дисперсной системы является основой получения новых экспериментальных данных для лучшего согласования и калибровки математических моделей.

Экспериментальная часть

Визуализация межфазных взаимодействий на основе оптической микроскопии

Дестабилизация пленочной нефти заключается в осаждении асфальтенов и адсорбции смол и масляных фракций на поверхности твердого тела в парах *n*-гексана из капель объема 50 микролитров. Все лабораторное оборудование размещается на предметном столе микроскопа МБС-10, предназначенного для наблюдения объемных объектов и протекающих процессов: капли, микрокапли нефти, растекание, осаждение, образование прозрачных и непрозрачных пленок. Съёмка осуществляется с помощью окулярной цифровой камеры для скоростной видеосъёмки ВидеоСпринт/G2/M (до 10000 кадров/сек) либо цифровой окулярной камерой DCM 500. На рис. 2 представлены принадлежности, необходимые для лабораторного исследования. Для опытов использовали стеклянные чашки Петри с крышкой. На дно чашки клали фильтровальную бумагу и смачивали её 1 или 2 мл *n*-гексана. В качестве подложек использовали пластинки полированного монокристаллического кремния $10 \times 10 \times 0,4$ мм, поверхность которых была окислена на глубину 0,8 мкм в производственных условиях. Поверхность такой подложки по химическому составу представляет слой SiO_2 , а



a/a



б/б

Рис. 2. а) принадлежности и инструменты для проведения опытов с пленками нефти; б) сканирующий зондовый микроскоп SolverPRO 47H

Fig. 2. a) accessories and tools for experiments with oil films; b) scanning probe microscopy SolverPRO 47H

по физическим свойствам подобна кварцу. Шероховатость поверхности подложки составляла 0,3–0,4 нм. Кроме этих подложек использовались предметные стекла для оптической микроскопии. Капли нефти наносили на подложку с помощью микрошприца или дозатора пипеточного, помещали в чашку Петри, насыщенную парами н-гексана, закрывали крышкой (рис. 2, а). При экспозиции нефти в парах н-гексана с помощью стереоскопического микроскопа МБС-10 можно было наблюдать, как она растекалась и последовательно изменялась её форма, цвет, прозрачность пленки, следить за её движением при наклоне подложки, а также наблюдать, как движутся частицы асфальтенов, идет их агрегация и осаждение. Полученные пленки нефти имели толщину порядка 200–300 мкм.

Визуализация межфазных взаимодействий на основе АСМ

Для исследования продуктов осаждения асфальтенов использовался сканирующий зондовый микроскоп SolverPRO 47H (рис. 2, б). Измерения проводились на воздухе при нормальных условиях. Для сканирования поверхности использовали зонды из монокристалла нитрида кремния с консолью 100 мкм и жесткостью от 5,5 до 10 Н/м. Согласно паспортным данным, острие зонда имеет радиус закругления 10 нм, угол схождения – не более 22°. Для получения изображения рельефа поверхности использовался прерывисто-контактный режим, минимизирующий влияние зонда на поверхность. Выполнялось сканирование образцом при неподвижном зонде. Детализация наноструктур на АСМ-изображениях достигалась применением приемов контрастирования путем регистрации сигнала рассогласования фазы колебаний зонда атомно-силового микроскопа – «фазовый контраст» и амплитуда.

Характеристика образца нефти

Нефть Западно-Салымского месторождения, пласты АС₁₁¹ и АС₁₁² (Ачимовская толща), скважина 50346. Интервал перфорации 2222–2226 м, пластовая температура 87 °С. Отбор на устье. Плотность 882,6 кг/м³, вязкость кинематическая при 20 °С – 23,3 мм²/с, содержание асфальтенов – 1,95 мас. % (по ГОСТ 11851–85), смолы не определены, вода – менее 0,03 % – следы (по ГОСТ 2477–65), объемная доля фракции выкипающей до 350 °С – 54 %.

Результаты и обсуждение

Дестабилизация нефтяной дисперсной системы внутри нефтяного пласта с практически гарантированным понижением вязкости остаточной нефти и образованием твердой фазы асфальтенового осадка происходит при физико-химическом воздействии растворителей, состоящих из легких насыщенных углеводородов метанового ряда. Эти растворители могут закачиваться в пласт вместе с водой, используемой для поддержания пластового давления. В качестве растворителя используется природный или попутный газ, газолин, легкая нефть, широкая фракция летучих углеводородов [18–20]. В пласте осаждающие асфальтены реагенты воздействуют не на объем нефти, а на границы раздела фаз, свойства которых зависят от контактирующих веществ: нефть–вода, нефть–газ (СО₂ или метан), нефть–порода.

В выполняемых нами экспериментах на поверхность пленок нефти воздействовали паровой фазой осадителя (н-гексана). Пленки нефти образовывались при растекании капель нефти, наносимых на поверхность стекла или окисленную кремниевую пластинку в атмосферных условиях и при температуре 22–24 °С. Со значительными допущениями моделировали следующие пластовые условия:

- пленки нефти объемом 50 мкл на поверхности стекла или окисленной кремниевой пластинки соответствуют размерам на уровне $\sim 1/2$ объема тетраэдрических и октаэдрических пустот идеального кварцевого песка с размером частиц 0,4–0,6 мм, то есть пленки нефти в трещине коллектора-песчаника;
- микрокапли смачивают поверхность, имея поверхность растекания с краевым углом $\varphi < 90^\circ$;
- атмосферные условия эксперимента близки по свойствам полярности к парам (или жидкости) воды, которые контактируют с пленками нефти в трещине песчаника, поэтому поверхность раздела нефть–воздух формируется теми же нефтяными молекулами, которые образуют поверхность раздела нефть – пластовая вода;
- пленки гомогенны в объеме, но в слоях, примыкающих к кварцевой поверхности, и на границе нефть–воздух концентрируются полярные компоненты, создавая полярную поверхность раздела.

Процесс наблюдения за изменениями на поверхности пленки нефти начинался немедленно после помещения капли нефти в камеру, насыщенную парами н-гексана. На рис. 3 представлена выборка кадров из видеофильма, показывающая изменение формы поверхности пленки нефти в результате воздействия молекул н-гексана. Кадровый период микровидеосъемки 12,5 мс. Первый кадр показывает исходное, невозмущенное состояние поверхности нефти в момент времени $t=0$, второй кадр – через 100 мс, третий – 130 мс, четвертый – 150 мс, а пятый – 600 мс. Представленный на рис. 3 процесс деформации и восстановления формы на отдельном участке поверхности пленки нефти возникает из-за локального уменьшения поверхностного натяжения в результате абсорбции в жидкую нефтяную фазу паров н-гексана. При наблюдении за всей поверх-

ностью пленки можно зафиксировать множество подобных процессов, которые длились в течение нескольких секунд, а затем начинался другой процесс – коагуляция асфальтенов, проходящий интенсивно, но с меньшей скоростью.

Анализ результатов видеосъемки показывает, что адсорбция на поверхности нефти микроскопических капель из паров н-гексана может значительно уменьшить межфазное поверхностное натяжение в локальной области пленки с деформацией поверхности и последующим восстановлением её формы. Параметры съемки не позволили зафиксировать детали процесса мгновенного разрушения межфазного поверхностного слоя, однако процесс деформации участка поверхности и её релаксации удалось зафиксировать достаточно отчетливо.

На рис. 4, а представлено фото капли нефти, растекшейся на подложке. В результате действия паров н-гексана в ней происходит процесс коагуляции асфальтенов, при котором наблюдается изменение цвета и прозрачности капли. На рис. 4, б можно видеть конечный результат этого процесса.

Микровидеосъемка процесса коагуляции асфальтенов показала, что сначала образуются агрегаты из асфальтенов. Их образование происходит в процессе движения, с последующим еще большим укрупнением агрегатов до флоккул. Движение частиц имеет радиальную направленность, от центра к краю, и обусловлено циркулирующим движением среды в вертикальной плоскости. При столкновениях частицы сцепляются и движутся совместно в циркулирующем потоке дисперсной среды с большой скоростью, что указывает на значительное понижение вязкости нефти. Микрочастицы оседают на краю капли, образуя кольцо с характерным рисунком. При застревании новых агрегатов между уже осевшими частицами наблюдается их быстрое вращение вокруг собственной оси.

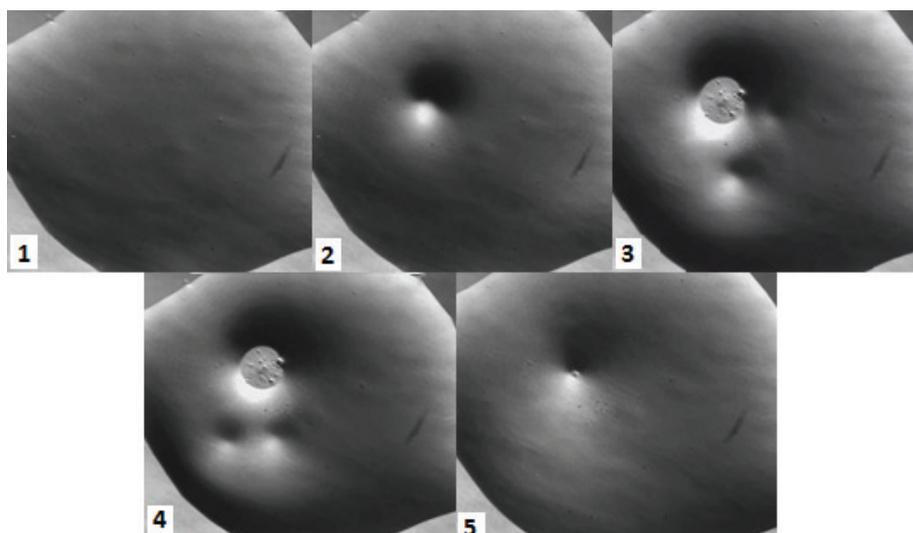


Рис. 3. Взаимодействие паров н-гексана с поверхностью капли нефти

Fig. 3. Interaction of n-hexane vapours with the surface of an oil drop

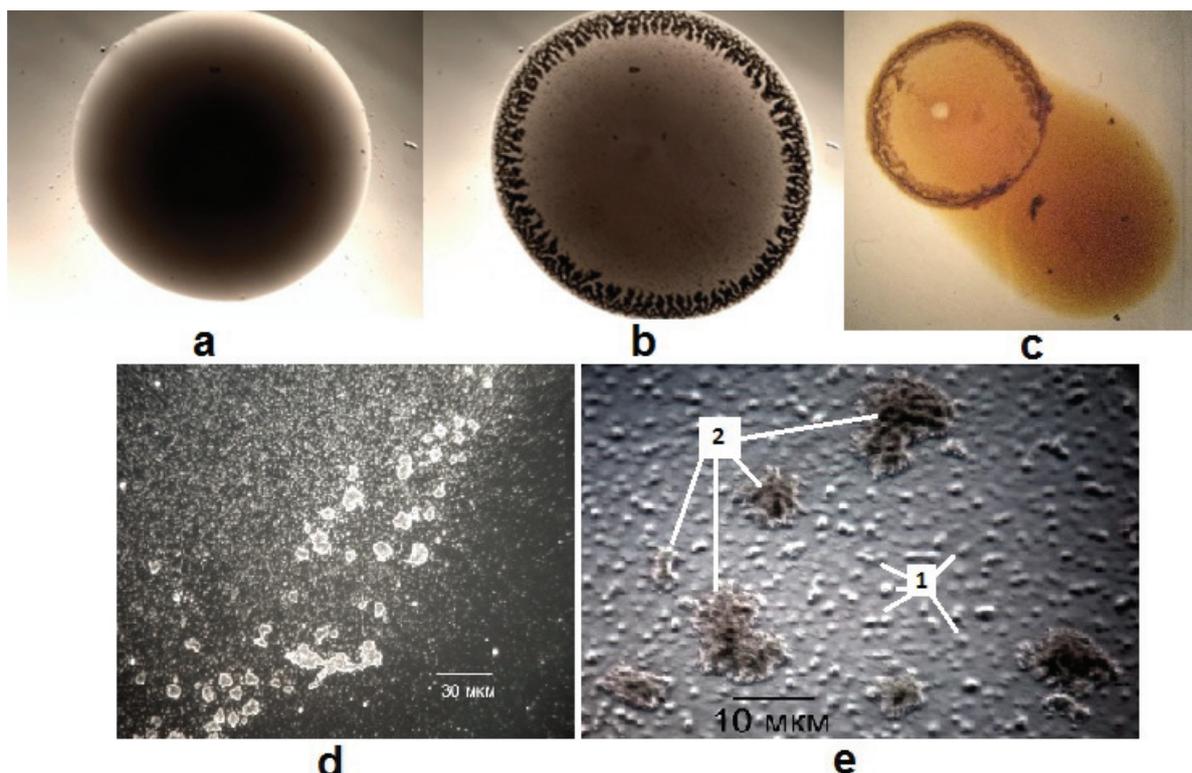


Рис. 4. Последовательность осаждения асфальтенов (а-с) и микрофотографии асфальтеновых структур (d, e) на поверхности подложки: а) исходная капля нефти (диаметр 3 мм); б) образование кольца из агрегатов асфальтенов, просветление капли; с) отделение легких фракций нефти от области осаждения асфальтенов при наклоне подложки; d) фрагмент области адсорбции асфальтенов, полученный методом фазового контраста; e) агрегаты (1) и флоккулы (2) асфальтенов

Fig. 4. Sequence of deposition of asphaltenes (a-c) and micrographs of structures of asphaltenes (d, e) on the surface of the substrate: a) the original oil droplet (the diameter is 3 mm); b) the formation of ring of the asphaltene aggregates, drop enlightment; c) the separation of oil light fractions from the asphaltene deposition area; d) the fragment of asphaltene deposition area obtained by the phase contrast method; e) the aggregates (1) and flocules (2) of asphaltenes

На рис. 4, с можно видеть, как при малейшем наклоне подложки от осажденной твердой фазы асфальтенов отделяется жидкая деасфальтизированная компонента нефти. На рис. 4, d представлена микрофотография фрагмента поверхности в кольцевой области, полученная методом фазового контраста. На ней видны крупные осевшие частицы – флоккулы. Цифрой 1 на рис. 4, e обозначены мелкие агрегаты из асфальтенов, а цифрой 2 – флоккулы из агрегатов асфальтенов. Размер адсорбированных флоккул асфальтенов в среднем от 1 до 5 мкм, наиболее крупных частиц из них – от 5 до 10 мкм. Флоккулы размером 5 мкм и более имеют рыхлую структуру, что видно на рис. 4, e.

Применение микроскопии фазового контраста позволило установить, что на поверхности раздела подложка – пленка нефти образуется тонкий слой из адсорбированного вещества. Структура вещества была изучена методом атомно-силовой микроскопии и описана ниже. Установлено, что адсорбированный слой не растворяется в н-гексане, но растворяется в толуоле. Было сделано предположение – это адсорбированные кластеры наноагрегатов асфальтенов.

Учитывая, что основной целью работы было изучение самоорганизации нефтяной системы на поверхности твердого тела в неравновесных условиях действия паров н-гексана, мы не оценивали кинетические аспекты процесса. Но можно отметить, что цифровая обработка микро-видео данных с применением компьютерной денситометрии и сегментации деталей изображения [21] позволит оценить значение константы скорости коагуляции асфальтенов.

Уравнение (4), описывающее процесс образования отложений асфальтенов в результате деасфальтизации микрообъема капли, имеет вид:

$$\frac{dN(t)}{dt} = K(N_0 - N(t))^2, \quad (4)$$

где K – константа скорости коагуляции; N_0 – исходное количество частиц; $N(t)$ – количество частиц в момент времени t .

Отсюда можно найти целый ряд параметров системы [22]:

- связь константы скорости коагуляции с вязкостью среды и температурой (5):

$$K = \frac{4}{3\eta} kT, \quad (5)$$

где η – кинематическая вязкость системы; k – постоянная Больцмана;

- связь константы скорости коагуляции с коэффициентом диффузии (6):

$$K = 8\pi dD, \quad (6)$$

где d – размер частиц дисперсной фазы (асфальтенов, смол); D – коэффициент диффузии;

- связь коэффициента диффузии, размера частиц дисперсной фазы и вязкости системы (уравнение Эйнштейна–Стокса (7)):

$$D = \frac{1}{6\pi\eta d} kT, \quad (7);$$

- критическое значение поверхностного или межфазного натяжения (уравнение Ребиндера–Щукина (8)):

$$\sigma_{кр} = \frac{\beta}{d^2} kT, \quad (8)$$

где $\beta=15...30$ – безразмерный коэффициент, учитывающий форму частиц и изменение энтропии

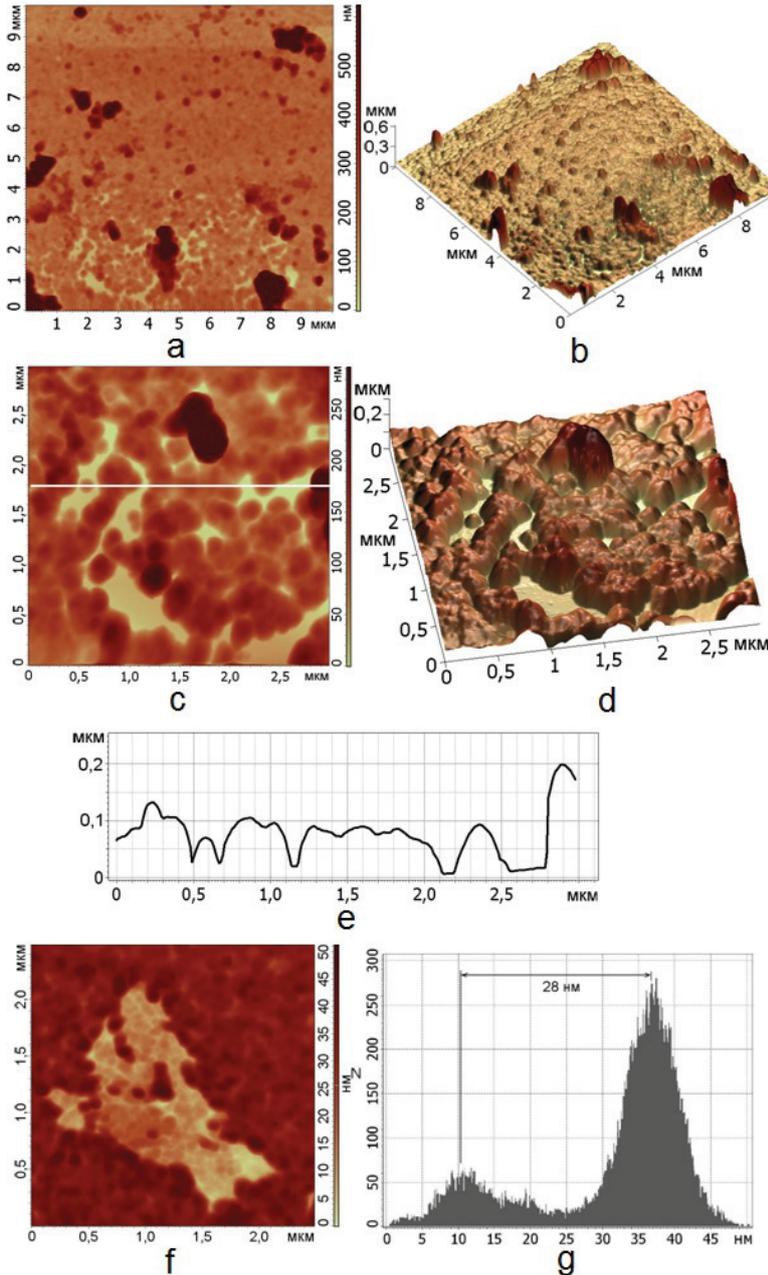


Рис. 5. АСМ-изображение (и элементы его обработки) фрагмента области осаждения асфальтенов на поверхности подложки: а), б), с), d), f) 2D и 3D-изображения; с) профиль сечения по координате $y=1,8$ мкм; г) плотность распределения значений функции $Z(X,Y)$

Fig. 5. AFM-image (and its processing) of a part of deposition of asphaltenes on the surface of the substrate: а), b), с), d), f) 2D and 3D images; с) the profile of cross section in the coordinate $y=1,8$ μm; г) the distribution density of $Z(X,Y)$ function values

при коагуляции или диспергировании коллоидных частиц [22, 23].

Для решения задачи определения морфологии и размера (d) дисперсных частиц – кластеров наноагрегатов асфальтенов – применен метод АСМ. С целью минимизации действия острого зонда применялся бесконтактный режим сканирования исследуемой поверхности.

На рис. 5, *a* и *b* приведены двух- и трехмерные АСМ-изображения поверхности подложки со слоями осажденных асфальтенов после стекания подвижной деасфальтизированной нефти из зоны осаждения. Масштаб АСМ-изображений по координатной оси z отличается от масштаба осей x и y в несколько раз, что приводит к вытянутости объектов по этой оси. Зафиксирована двухслойная структура адсорбата. На поверхности слоя наблюдаются наноагрегаты асфальтенов размером от 10 до 100 нм и агрегаты размером от 0,1 до 0,35 мкм, флоккулами можно назвать образования с размером от 0,3 до 1 мкм. Между частицами на поверхности подложки есть свободное пространство, этот фрагмент поверхности использован для проведения профиля сечения и измерения размеров отдельных адсорбированных частиц. По профилю сечения (рис. 5, *e*), проведенному по координате $y=1,8$ мкм на рис. 5, *c*, диаметр самых мелких структур, измеренный в их основании, составляет 100–130 нм, а их высота – от 50 до 100 нм. Наиболее крупные частицы имеют размеры до 350 нм.

По изображению двухслойной структуры, состоящей из агрегатов асфальтенов (рис. 5, *f*), сделана статистическая оценка средних размеров частиц (d) в верхнем слое адсорбированных класте-

ров наноагрегатов асфальтенов. Расстояние между пиками гистограммы значений плотности распределения функции $Z(X_i Y_j)$ (рис. 5, *g*), соответствует среднему размеру частиц в верхнем слое $d=28$ нм. Этот размер был принят за диаметр кластера наноагрегата ассоциативных асфальтеновых структур нефтяной дисперсной системы [24]. В таком случае величина критического поверхностного натяжения асфальтенов при температуре 298 К, оцененная на основании уравнения (8), составляет $0,8...1,5 \cdot 10^{-4}$ Дж/м².

При значениях $\sigma \leq \sigma_{кр}$ в нефтяной дисперсной системе будет происходить самопроизвольное диспергирование асфальтенов, а при значениях $\sigma > \sigma_{кр}$ – образование кластеров наноагрегатов, осаждение и образование флоккул. Можно сделать предположение, что наблюдаемый в работе процесс перехода пробы нефти из равновесного в неравновесное состояние происходил из-за изменения значения поверхностного натяжения асфальтенов нефти, в результате действия паров *n*-гексана, т. е. добавления в систему новой компоненты. Приведенные в работе уравнения (2) и (3) описывают эти два состояния асфальтенов.

Для выяснения характера взаимодействия между кластерами наноагрегатов асфальтенов в слое (рис. 6, *a*) нами был проведен простой и наглядный опыт. Участок поверхности размером 2×2 мкм сканировали в контактном режиме (рис. 6, *b*). Прилипания асфальтенов к зонду не происходило, все сдвинутые им асфальтены остались на образце и образовали флоккулу.

По морфологическим признакам так ведет себя структура, обладающая скорее вязкоупругими

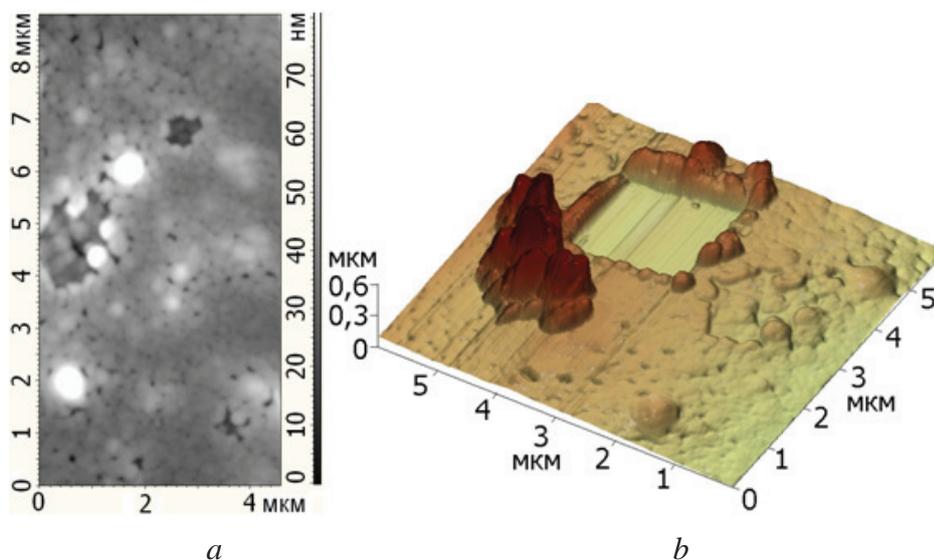


Рис. 6. АСМ-изображение многослойного покрытия асфальтенами поверхности подложки: а) вид сверху; б) трехмерное изображение рельефа поверхности с углублением прямоугольной формы, сделанной зондом атомно-силового микроскопа в многослойном покрытии асфальтенами подложки

Fig. 6. AFM-image of the multilayer coating of the substrate surface with the asphaltenes: а) the top view; б) the three-dimensional image of the surface relief with the rectangular shaped recess made by a probe of the atomic force microscope in the multilayer coating of the asphaltenes substrate

свойствами, чем пластическими или хрупкими. Механическое воздействие на адсорбированный слой, обладающий вязкоупругими свойствами, приводит к отрыву слоя от адсорбционной поверхности и мгновенному сворачиванию частиц во флоккулу. Образующиеся флокулярные и более крупные структуры, из-за слабой связи с подложкой, могут быть сорваны со своего места потоком деасфальтизированной нефти и перенесены в другое место.

Во всех проведенных экспериментах образование третьего слоя асфальтенов не наблюдалось. Вместо него из агрегатов асфальтенов начинают образовываться флокулы, которые за счет конвективных потоков перемещаются к периметру ка-

пли, где оседают в виде кольцевого грубодисперсного депозита. Эти образования относительно подвижны и под действием механических факторов могут сдвигаться.

В результате процесса деасфальтизации капли осветленной нефти становятся настолько подвижными, что при малейшем наклоне подложки истекают из области отложения асфальтенов. Поэтому в данной работе было проведено изучение продуктов адсорбции при движении жидкой капли нефти по подложке. Наблюдения, сделанные при выполнении опыта, были обобщены в схеме, представленной на рис. 7, а.

На рис. 7, b, c представлены АСМ-изображения участков поверхности подложки, обозначенные на

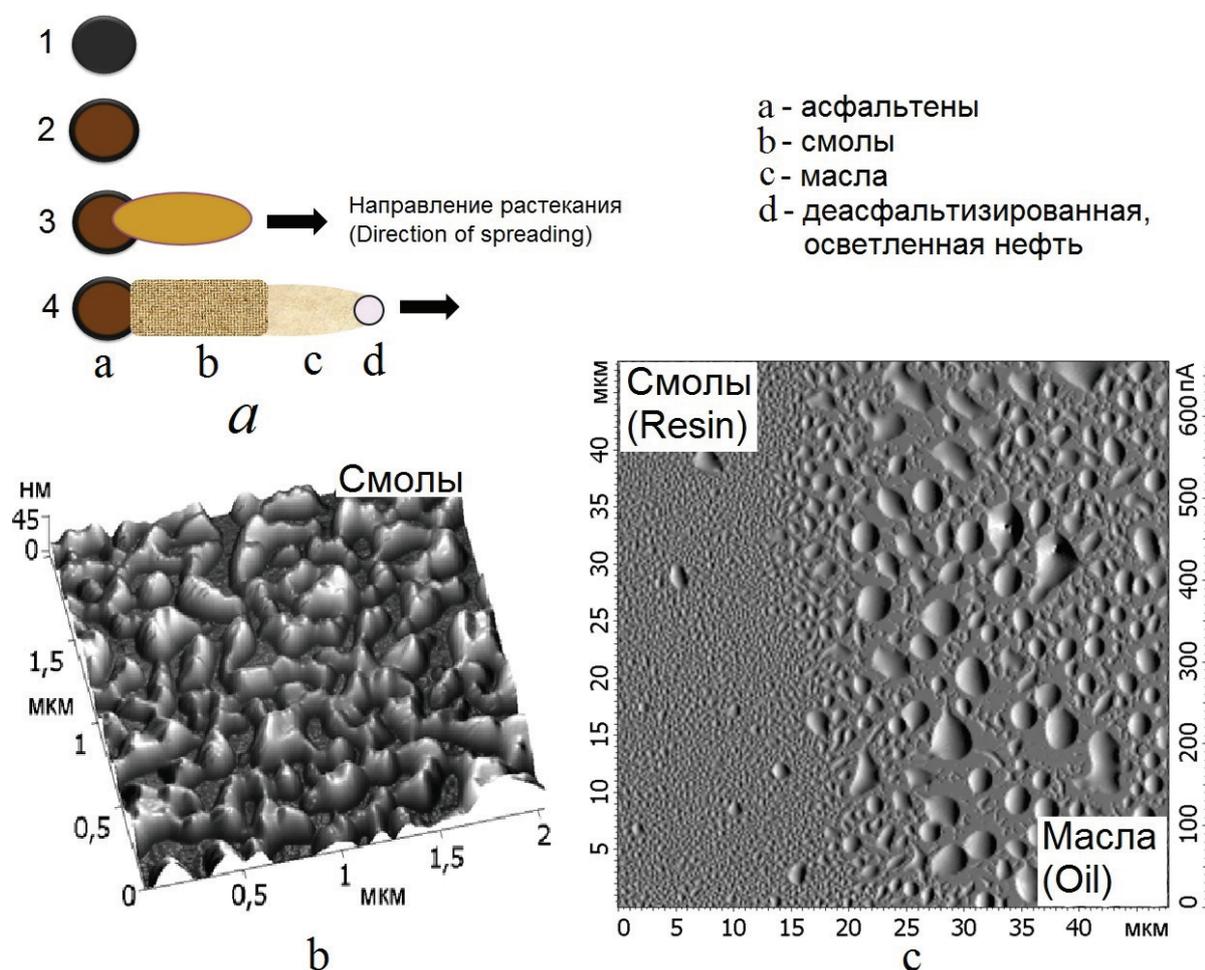


Рис. 7. А) схема процесса деасфальтизации капли нефти в парах *n*-гексана: 1 – исходная капля нефти на поверхности стекла; 2 – образование отложений из асфальтенов и осветление нефти; 3 – растекание подвижной, деасфальтизированной нефти по поверхности подложки; 4 – в процессе растекания капли нефти образуется адсорбат, состоящий из: а) асфальтенов и парафинов; б) смол; в) масел; г) деасфальтизированной и осветленной нефти. б) трехмерное АСМ-изображение фрагмента области адсорбции смол, что соответствует на рис. 7, А участку, обозначенному буквой «б». в) АСМ-изображение фрагмента поверхности с адсорбированными смолами и маслами

Fig. 7. А) the scheme of asphaltene precipitation of oil drop in *n*-hexane vapor: 1 is the initial oil drop on the glass surface; 2 is the formation of asphaltenes deposit and oil lightening; 3 is movable spreading of mobile deasphaltizing oil on the surface of the substrate; 4 in the course of spreading of oil drop the adsorbate consisting from: a) asphaltenes; b) resins; c) oils; d) clarified liquid oil is formed; б) the three-dimensional ASM-image of a fragment of resin adsorption area that corresponds to the site designated with the letter «b» in fig. 7, a; в) the ASM-image of a fragment of the surface with the adsorbed resins and oils

рисунке 7, а, как «b» и «с» – смолы и масла. Трехмерное АСМ-изображение фрагмента поверхности с адсорбированными смолами показано на рис. 7, b. АСМ-изображение участка поверхности с адсорбированными смолами и маслами показано на рис. 7, с. Можно видеть, что в процессе растекания деасфальтизированной нефти происходила последовательная адсорбция смол и масел. Морфология области адсорбции смол существенно отличается от области адсорбции масел.

Наблюдаемое осаждение асфальтенов и последовательное разделение смол, масел и светлых фракций нефти в определенной мере схоже с ситовыми явлениями, сопровождающими течения нефти в пористой среде, и является результатом межфазных взаимодействий в самой нефтяной дисперсной системе и её отдельных микрокомпонентов с поверхностью растекания [3, 7].

Заключение

Используя оригинальную методику исследования процесса осаждения асфальтенов пленочной нефти в условиях дестабилизирующего воздействия паров n-гексана, охарактеризованы морфологические свойства агрегатов асфальтенов. На исследуемой поверхности зафиксировано несколько адсорбционно удерживаемых структурных образований из асфальтенов: наноагрегаты – 10–100 нм; агрегаты – 100–350 нм; флоккулы – 0,3–1 мкм. Методом оптической и атомно-силовой микроскопии установлено, что ближайший к поверхности подложки слой адсорбированного вещества представляет собой двухслойное образование из кластеров наноагрегатов асфальтенов. Верхний слой более рыхлый, чем нижний, и, возможно, менее упорядочен. По данным атомно-силовой микроскопии определена средняя толщина одного слоя, которая была принята за средний размер кластера наноагрегата асфальтенов $d=28$ нм.

Определенный авторами размер наноагрегата асфальтенов позволил рассчитать критическое значение поверхностного или межфазного натяжения асфальтенов нефти при температуре 298 К и сделать предположение, что наблюдаемый в работе процесс перехода пробы нефти из равновесного в неравновесное состояние происходил из-за измене-

ния значения поверхностного натяжения асфальтенов нефти, в результате действия паров n-гексана, т. е. добавления в систему новой компоненты. Приведенные в работе уравнения (2) и (3) описывают эти два состояния асфальтенов.

Образование третьего слоя из кластеров наноагрегатов асфальтенов не наблюдалось, вместо него из кластеров наноагрегатов асфальтенов начинают образовываться агрегаты и флоккулы с последующим осаждением по периметру пленки в виде кольцевого грубодисперсного депозита.

Установлено, что при механическом воздействии острая зонда на асфальтеновые наноструктуры происходит отрыв частиц от адсорбционной поверхности и «сворачивание» их в флоккулы.

В работе показано, что деасфальтизированная пленка нефти даже при малых напряжениях сдвига отделяется от области осаждения асфальтенов и растекается по поверхности подложки. Пленка нефти, растекаясь по подложке, испытывает действие поверхностных сил со стороны подложки. Результатом этого взаимодействия является адсорбционное фракционирование нефти на смолы и масла, которые последовательно адсорбируются на поверхности твердого тела.

Полученные результаты позволяют сделать предположение, что при дестабилизации нефтяной дисперсной системы в нефтяном пласте на поверхности порового пространства может находиться вполне определенная доля осаждающихся асфальтенов – адсорбционно удерживаемая самоорганизующаяся система ассоциатов. Другая часть асфальтенов, структурированная в форме агрегатов и флоккул, образует отложения в виде твердой фазы по краям пленок нефти. Незначительная часть этой твердой фазы может двигаться вместе с деасфальтизированной нефтью.

Результаты исследования показывают, что данная работа может быть основой для развития комплексной методики изучения протекания неравновесных термодинамических процессов в пленках нефти при добавлении в эту систему новых компонент.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 15-45-00057, вид проекта «урал_а, региональный конкурс Урал: инициативные».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Институт химии нефти Сибирского отделения РАН. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 192 с.
2. Ганеева Ю.М., Юсупова Т.Н., Романов Г.В. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем // Успехи химии. – 2011. – Т. 80. – № 10. – С. 1034–1050.
3. Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics / O.C. Mullins, E.Y. Sheu, A. Hammami, A.G. Marshall. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. – 677 p.
4. Asphaltenes Explained for the Nonchemist / O.C. Mullins, A.E. Pomerantz, A.B. Andrews, J.Y. Zuo // *Petrophysics*. – 2015. – V. 56. – № 3. – P. 266–275.
5. Unraveling the Molecular Structures of Asphaltenes by Atomic Force Microscopy / B. Schuler, G. Meyer, D. Pena, O.C. Mullins, L. Gross // *Journal of the American Chemical Society*. – July, 2015. – V. 31. – № 137. – P. 1–7.
6. Буря Е.Г. Исследование агрегативной устойчивости нефтей при взаимодействии с углеводородными растворителями: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2002. – 106 с.
7. A New Model for Describing the Adsorption of Asphaltenes on Porous Media at a High Pressure and Temperature under Flow Con-

- ditions / N.N. Nassar, T. Montoya, C.A. Franco, F.B. Cortés, P. Pereira-Almao // *Energy Fuels*. – 2015. – V. 29. – № 7. – P. 4210–4221.
8. ГОСТ 11851–85. Нефть. Метод определения парафина. – М.: Стандартинформ, 2006. – 21 с.
9. Методы извлечения остаточной нефти / М.Л. Сургучев, А.Т. Горбунов, Д.П. Забродин и др. – М.: Недра, 1991. – 347 с.
10. Asphaltene Precipitation in Crude Oils: Theory and Experiments / E. Buenrostro-Gonzalez, C. Lira-Galeana, A. Gil-Villegas, J. Wu // *AIChE Journal*. – October 2004. – V. 50. – № 10. – P. 2552–2570.
11. Камьянов В.Ф. Высокомолекулярные гетероатомные компоненты нефтей: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Томск, 1992. – 261 с.
12. Ferris S.W., Black E.P., Clelland J.B. Aromatic structures in asphaltic fractions // *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Develop.* – 1967. – V. 6. – № 2. – P.127–132.
13. Yen T.F. Structure of petroleum asphaltenes and its significance // *Energy Sources*. – 1974. – V. 1. – № 6. – P. 447–456.
14. Рентгено-дифракционный анализ смолисто-асфальтеновых компонентов западно-сибирской нефти / В.Ф. Камьянов, Н.В. Бодрая, П.П. Сивирилов, Ф.Г. Унгер, Т.А. Филимонова, В.Н. Чернявский // *Нефтехимия*. – 1989. – Т. 29. – № 1. – С. 1–13.
15. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular Size and Structure of Asphaltenes from Various Sources // *Energy & Fuels*. – May 2000. – V. 14. – № 3. – P. 677–684.
16. A multicomponent diffusion model for gas charges into oil reservoirs / S. Pan, J.Y. Zuo, K. Wang, Y. Chen, O.C. Mullins // *Fuel*. – 2016. – V. 180. – P. 384–395.
17. Оценка параметра растворимости алкилфенолформальдегидных смол / Н.А. Охотина, Д.А. Ведашкина, М.Ф. Ильязов, А.П. Савельчев // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2011. – № 7. – С. 114–118.
18. Single horizontal well process for solvent/solute stimulation: пат. США № 5167280 А. опубл.: 01.12.1992.
19. Combined steam and vapor extraction process (savex) for in situ bitumen and heavy oil production: пат. США № 6662872 В2. опубл.: 16.12.2003.
20. Способ извлечения высоковязких нефтей и природных битумов из залежи: пат. РФ № 2475636. опубл.: 20.02.2013. – Бюл. № 5.
21. Burger W., Burge M.J. *Digital Image Processing: an Algorithmic Introduction Using Java (Texts in Computer Science)*. 2nd edition. – New York: Springer, 2016. – 811 p.
22. Щукин Е.Д., Перцов Е.В., Амелин Е.А. *Коллоидная химия*. 7-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2004. – 444 с.
23. Органические нефтяные отложения и их утилизация / А.З. Биккулов, Р.Г. Нигматуллин, А.К. Камалов, В.Ю. Шолом. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1997. – 180 с.
24. Акбарзаде К., Асфальтены: проблемы и перспективы / К. Акбарзаде, А. Хаммами, А. Харрат, Д. Чжан, С. Алленсон, Д. Крик, Ш. Кабир, А. Джамалуддин, А.Дж. Маршал, Р.П. Роджерс, О.К. Маллинс, Т. Солбаккен // *Нефтегазовое обозрение*. – Лето, 2007. – С. 28–53.

Поступила 26.09.2016 г.

Информация об авторах

Коржов Ю.В., кандидат химических наук, доцент кафедры геологии Института природопользования Югорского государственного университета.

Орлов С.А., кандидат физико-математических наук, директор АНО «Югорский центр нанотехнологий».

UDC 553.982.2

AGGREGATION AND COAGULATION OF ASPHALTENES IN OIL FILM: PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SURFACE DEPOSIT PRODUCTS

Yuriy V. Korzhov¹,
ykor1962@mail.ru

Sergey A. Orlov²,
yunitov@mail.ru

¹ Yugra State University,
16, Chekhov Street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia.

² Yugra Nanotechnology Center,
45, Chekhov Street, Khanty-Mansiysk, 628007, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the practical significance of studying aggregation of asphaltenes in oil film and determining the dimensional parameters of micro- and nanostructures of the deposited components. The previously conducted researches on deposition of asphaltenes from solutions of oil in *n*-hexane were not associated with the study of such objects as «film oil – *n*-hexane vapors». For this reason, the studies on development of methods for imaging coagulation and deposition of asphaltenes in oil films are of special scientific interest.

The main aim of the study is to get the experimental data on aggregation of asphaltenes of film oil on the surface of a solid body in terms of destabilizing effects of *n*-hexane vapors; to study the morphology and determine the dimensional parameters of the precipitated asphaltenes.

The methods used in the study. The authors have applied microvideo for detecting fast processes on the surface of oil films in *n*-alkanes vapors. Coagulation and deposition of asphaltenes in oil films were visualized using digital optical microscopy. The morphology and structural parameters of the precipitated asphaltenes were determined by atomic force microscopy (AFM).

The results. It was ascertained that in the system «oil film – *n*-hexane vapor», the aggregation of asphaltenes is preceded by local deformation of the film surface in areas of adsorption and penetration of saturated vapor of *n*-hexane into the oil phase. Typical movement of microparticles of asphaltenes in oil film recorded by the digital optical microscopy can be explained by disperse medium circulation. Using the atomic force microscopy method the authors determined the dimensional parameters of the precipitated asphaltene structure. The paper demonstrates the possibility of applying the atomic force microscopy for imaging resins and oils in adsorbed state. The results show that oil asphaltenes deposition on a solid body surface is in nonequilibrium conditions. The research can be used to develop the integrated methodology to study aggregation and coagulation of asphaltenes in oil films using digital optical microscopy and microvideo, and to study the morphology of precipitated asphaltene nanostructures by the atomic force microscopy.

Key words:

Asphaltenes, film oil, oil dispersion system, aggregation, asphaltene precipitation and coagulation, surface tension, optical microscopy, atomic force microscopy.

The research was supported by the Russian Foundation of Fundamental Researches in the project 15–45–00057 «Regional competition «Ural»: initiative».

REFERENCES

- Unger F.G., Andreeva L.N. *Fundamentalnyie aspekty khimii nef-ti. Priroda smol i asfaltenov. Institut khimii nef-ti Sibirskogo otdeleniya RAN* [Fundamental aspects of petroleum chemistry. The nature of resins and asphaltenes. Institute of petroleum chemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian publishing firm RAS, 1995. 192 p.
- Ganeeva Yu.M., Yusupova T.N., Romanov G.V. Asphaltene nano-aggregates: structure, phase transformations, effect on the properties of petroleum systems. *Uspekhi khimii*, 2011, vol. 80, no. 10, pp. 1034–1050. In Rus.
- Mullins O.C., Sheu E.Y., Hammami A., Marshall A.G. *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*. New York, Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 677 p.
- Mullins O.C., Pomerantz A.E., Andrews A.B., Zuo J.Y. Asphaltenes Explained for the Nonchemist. *Petrophysics*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 266–275.
- Schuler B., Meyer G., Pena D., Gross L. Unraveling the Molecular Structures of Asphaltenes by Atomic Force Microscopy. *Journal of the American Chemical Society*, July 31, 2015, vol. 31, no. 137, pp. 1–7.
- Burya E.G. *Issledovanie agregativnoy ustoychivosti nef-tey pri vzaimodeystvii s uglevodorodnymi rastvoritel'yami*. Dis. Kand. nauk [The study of aggregative stability of oils at interaction with hydrocarbon solvents. Cand. Diss.]. Moscow, 2002. 106 p.
- Nassar N.N., Montoya T., Franco C.A., Cortés F.B., Pereira-Al-mao P. A New Model for Describing the Adsorption of Asphaltenes on Porous Media at a High Pressure and Temperature under Flow Conditions. *Energy Fuels*, 2015, vol. 29, no. 7, pp. 4210–4221.
- GOST 11851–85. Neft. Metod opredeleniya parafina* [State Standard. Oil. Method for determining paraffin]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 21 p.
- Surguchev M.L., Gorbunov A.T., Zabrodin D.P. *Metody izvlecheniya ostatochnoy nef-ti*. [Methods of extraction of residual oil]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 347 p.
- Buenrostro-Gonzalez E., Lira-Galeana C., Gil-Villegas A., Wu J. Asphaltene Precipitation in Crude Oils: Theory and Experiments. *AIChE Journal*, October 2004, vol. 50, no. 10, pp. 2552–2570.
- Kamyanov V.F. *Vysokomolekulyarnye geteroatomnye komponenty nef-tey*. Dis. Dokt. nauk [High-molecular heteroatomic components of crude oils. Dr. Diss.]. Tomsk, 1992. 261 p.

12. Ferris S.W., Black E.P., Clelland J.B. Aromatic structures in asphaltic fractions. *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Develop.*, 1967, vol. 6, no. 2, pp. 127–132.
13. Yen T.F., Structure of petroleum asphaltenes and its significance. *Energy Sources*, 1974, vol. 1, no. 6, pp. 447–456.
14. Kamyarov V.F., Bodraya N.V., Sivirilov P.P., Unger F.G., Filimonova T.A., Chernyavskiy V.N. X-ray diffraction analysis of resinous-asphaltenic components of West Siberian oil. *Neftekhimiya*, 1989, vol. 29, no. 1, pp. 1–13. In Rus.
15. Groenzin H., Mullins O.C. Molecular Size and Structure of Asphaltenes from Various Sources. *Energy & Fuels*, May 2000, vol. 14, no. 3, pp. 677–684.
16. Pan S., Zuo J.Y., Wang K., Chen Y., Mullins O.C. A multicomponent diffusion model for gas charges into oil reservoirs. *Fuel*, 2016, vol. 180, pp. 384–395.
17. Okhotina N.A. Vedyashkina D.A., Ilyasov M.F., Savelchev A.P. Estimation of solubility parameter of alkylphenolformaldehyde resins. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, no. 7, pp. 114–118. In Rus.
18. Diaz Z., French R.N., Worren G.M. *Single horizontal well process for solvent/solute stimulation*: Pat. USA no. 5167280 A, 2012.
19. Gutek H., Harschnitz B., Myers R.D., Okazawa T. *Combined steam and vapor extraction process (savex) for in situ bitumen and heavy oil production*: Pat. USA no. 6662872 B2, 2003.
20. Yakubov M.R., Borisov D.N., Romanov G.V., Margulis B.Ya., Ibatullin R.R., Ibragimov N.G., Yakubson K.I. *Sposob izvlecheniya vysokovyazkikh neftey i prirodnykh bitumov iz zalezhi* [A method of extracting heavy oil and natural bitumen out of deposits]. Pat. RF no. 2475636, 2013.
21. Burger W., Burge M.J. *Digital Image Processing: an Algorithmic Introduction Using Java (Texts in Computer Science)*. 2nd edition. New York, Springer, 2016. 811 p.
22. Shehukin E.D. *Kolloidnaya khimiya* [Colloidal chemistry]. Moscow, Yurayt Publ., 2006. 444 p.
23. Bikkulov Z.A., Nigmatullin R.G., Kamalov A.K., Sholom V.Yu. *Organicheskie neftyanye otlozheniya i ikh utilizatsiya* [Organic sludge and their recycling]. Ufa, USATU Publ., 1997. 180 p.
24. Akbarzade K., Khammami A., Kharrat A., Zhang D., Allenson S., Crick D., Kabir S., Jamaluddin A. (Jamal), Marshall A.D., Rodgers R.P., Mullins O.K., Solbakken T. Asphaltene: problemy i perspektivy [Asphaltene: problems and prospects]. *Oil and gas review*. Summer 2007. pp. 28–53.

Received: 26 September 2016.

Information about the authors

Yuriy V. Korzhov, Cand. Sc., associate professor, Yugra State University.

Sergey A. Orlov, Cand. Sc., director of Yugra Nanotechnology Center.

УДК 532.528+532.574.7+532.582.32

УПРАВЛЕНИЕ КАВИТАЦИЕЙ НА ДВУМЕРНОМ ГИДРОКРЫЛЕ ПОСРЕДСТВОМ НЕПРЕРЫВНОЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Тимошевский Михаил Викторович^{1,2},
timoshevskiy.mv@gmail.com

Запрягаев Иван Игоревич^{1,2},
ivanzapryagaev@gmail.com

Первунин Константин Сергеевич^{1,2},
pervunin@itp.nsc.ru

Мальцев Леонид Иванович¹,
maltzev@itp.nsc.ru

Маркович Дмитрий Маркович^{1,2,3},
dmark@itp.nsc.ru

Ханьялич Кемал^{2,4},
khanjalic@gmail.com

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1

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

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ Делфтский технический университет, Нидерланды, 2628 BL, Delft, Julianalaan, 136.

Возникновение разного рода неустойчивостей, в том числе вызванных кавитацией, в проточных трактах гидравлических систем негативным образом сказывается на производительности, надежности и безопасности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования. Данное обстоятельство требует развития разных методов управления такими течениями.

Цель работы: определение возможности применения и оценка эффективности метода управления динамикой частичных каверн, основанного на непрерывной тангенциальной инъекции жидкости.

Методы исследования. Для изучения этапов развития и пространственной структуры, а также оценки интегральных параметров парогазовых каверн применялась высокоскоростная визуализация. Измерение пространственных распределений средней скорости и турбулентных характеристик одно- и двухфазных течений вблизи модельного гидрокрыла осуществлялось методом анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry – PIV).

Результаты. Исследования проводились на модифицированной модели направляющих лопаток высоконапорной турбины, оснащенной поперечным щелевым каналом в поверхности для генерации пристенной струи с целью подпитки дополнительным импульсом подторможенных слоев жидкости со стороны разрежения. В экспериментах угол атаки модельного гидропрофиля изменялся от нуля до девяти градусов, а различные условия обтекания достигались путем вариации числа кавитации в широком диапазоне. На основе визуального анализа реализующихся режимов течения, начиная от зарождения кавитации и заканчивая развитыми нестационарными кавернами, определялось влияние инъекции на кавитацию. Эффект инжектирования жидкости с разной скоростью на гидродинамику течения оценивался путем измерений ансамблей мгновенной скорости, по которым рассчитывались распределения средних и турбулентных характеристик. Показано, что низкоскоростная инъекция жидкости вдоль поверхности гидропрофиля приводит к интенсификации турбулентных флуктуаций в пограничном слое и тем самым затягивает развитие присоединенной каверны вследствие порождения дополнительных возмущений в потоке. Инъекция с высокой скоростью, в свою очередь, вызывает увеличение локальной скорости течения и снижение турбулентных флуктуаций вблизи поверхности, что позволяет повысить коэффициент подъемной силы крыла и его гидродинамическое качество за счет снижения давления со стороны разрежения при относительно небольших энергетических затратах на генерацию пристенной струи. Однако в данном случае кавитационная каверна становится длиннее. Таким образом, низкоскоростная инъекция оказывается эффективной для ослабления кавитации, но инжектирование жидкости с высокой скоростью более предпочтительно с точки зрения гидродинамики течения. Следовательно, реализованный метод управления представляет собой весьма действенное средство для управления гидродинамическими характеристиками крыла и снижения интенсивности парообразования и при определенных условиях даже подавления нестационарностей, связанных с кавитацией.

Ключевые слова:

Кавитация, частичные каверны, нестационарность, управление потоком, непрерывная тангенциальная инъекция, направляющая лопатка, высокоскоростная визуализация, PIV.

Введение

Развитие разного рода неустойчивостей в проточных трактах гидравлических систем негативным образом сказывается на производительности, надежности и безопасности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования. Как следствие, из-за роста амплитуды пульсаций расхода и давления существенно увеличиваются нагрузки на компоненты гидравлических машин. Одним из наиболее распространенных и опасных источников нестационарностей являются кавитационные процессы. Для управления кавитацией можно использовать различные методы воздействия на элементы гидравлической системы, которые позволяют значительно подавить уровень шума техники и вибрационных нагрузок на элементы несущих конструкций и исключить или существенно снизить риски возникновения резонансных явлений. Управление кавитационными процессами необходимо для задержки развития самой кавитации, а также для полного или хотя бы частичного избавления от ее негативного влияния. В связи с этим детальное исследование причин и механизмов развития неустойчивостей и разработка способов для эффективного управления кавитирующими течениями являются крайне актуальными задачами как со стороны фундаментальной науки, так и для совершенствования современного машинного оборудования.

Хорошо известно, что при определенных условиях присоединенные каверны становятся неустойчивыми [1–3]. Согласно современной классификации существует два основных вида неустойчивости частичных (неполных) каверн [3]: внутренние (естественные) и внешние (системные). Если неустойчивость порождается самой каверной, она называется внутренней. Если же она вызвана взаимодействием каверны с другими кавернами или элементами гидравлической системы, например подводными и отводящими каналами, неустойчивость является внешней. Хорошо исследованная облачная кавитация, сопровождающаяся квазипериодическими отрывами парогазовых облаков, обусловлена развитием естественной неустойчивости – возвратного течения под каверной ([4–6]). Наиболее распространенным случаем системных неустойчивостей является так называемый кавитационный скачок (описание в [3]), который характерен для относительно длинных и тонких каверн (обычно для каверн длиной 75–100 % от длины хорды тела). При этом пульсации каверны возникают вследствие распространения волн давления вдоль канала. Данный тип неустойчивости характеризуется колебаниями на частотах в два и более раз меньшими, чем при облачной кавитации.

Управление зарождением и развитием кавитации может осуществляться как активными, так и пассивными способами. На сегодняшний день существует несколько перспективных методов активного управления кавитационными потоками,

основанных на различных базовых принципах и доказавших свою эффективность на практике. Наиболее известными из них являются контроль количества ядер кавитации посредством ультразвука или электролиза [7, 8], инжекция или отбор жидкости через поверхность тела обтекания [9] и принудительная турбулизация пограничного слоя путем наложения внешних колебаний [10]. Во всех пассивных методах управление кавитацией осуществляется путем изменения свойств поверхности тем или иным образом, без дополнительного энергетического воздействия на поток: выбор материала поверхности с заданными свойствами [11], нанесение нерегулярной [12, 13] или регулярной [14, 15] шероховатости, а также использование податливых покрытий [16]. Однако одним из наиболее простых в реализации и перспективных методов управления является непрерывная тангенциальная инжекция жидкости вдоль поверхности тела обтекания с целью введения дополнительного импульса в пограничный слой для преодоления неблагоприятного градиента давления [17].

В данной статье изучается возможность управления динамикой кавитационных каверн, возникающих со стороны разрежения уменьшенной модели направляющей лопатки высоконапорной гидравлической турбины, посредством непрерывной тангенциальной инжекции жидкости через поперечный щелевой канал в поверхности. В основе исследования лежит анализ результатов высокоскоростной визуализации присоединенных каверн и сравнение распределений средней скорости и турбулентных характеристик течения вблизи гидрокрыла.

Условия эксперимента и методика измерений

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. Описание стенда, условий эксперимента и используемых методов измерений подробно изложено в [18]. Объектом исследования являлась уменьшенная модель направляющей лопатки (НЛ) высоконапорной турбины с длиной хорды $C=100$ мм, представляющая собой двумерное гидрокрыло, геометрия которого показана на рис. 1 и в таблице. Форма НЛ была максимально приближена к реальной: гидрокрыло имело тупую заднюю кромку высотой 1,3 мм (что является характерным для реальных лопаток) в отличие от предыдущего исследования [19], в котором рассматривалась НЛ с острой задней кромкой. Гидрокрыло было изготовлено из латуни со средним уровнем шероховатости поверхности около 1,5 мкм. Ось вращения НЛ располагалась на расстоянии 0,54C от передней кромки. Максимальная толщина НЛ составляла $H_{\max}=0,2206C$ на расстоянии $x_{\max}=0,4396C$ от ее передней кромки. Исследования были выполнены для углов атаки $\alpha=0, 3$ и 9° . Для достижения различных кавитационных режимов в экспериментах варьировалось число кавитации $\sigma=(p_{in}-p_v)/(\rho U_0^2/2)$, где p_{in} – давление на входе в ра-

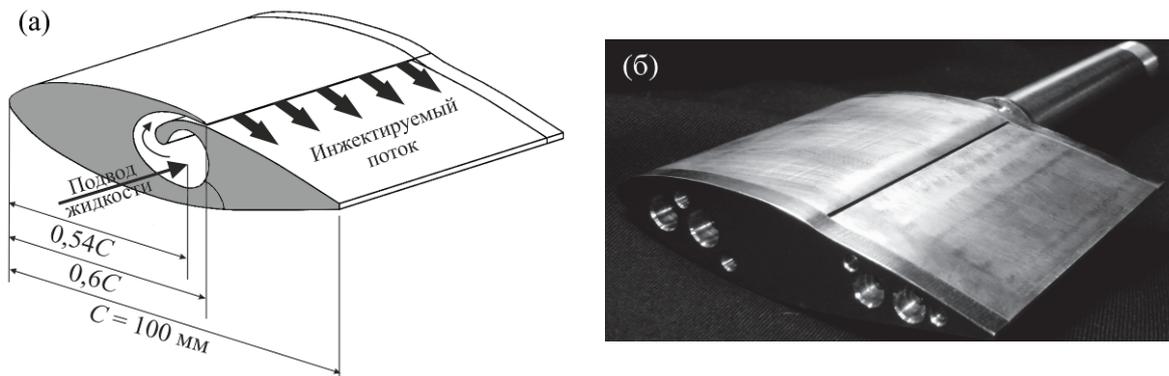


Рис. 1. (а) Трехмерная схема и (б) фотография собранной модели НЛ. Максимальная толщина НЛ составляет $H_{\max}/C=0,2206$ на расстоянии $x_{\max}/C=0,4396$ от передней кромки. Радиус округления носовой части – 1,97 мм, высота усеченной задней кромки – 1,3 мм

Fig. 1. (a) 3D scheme and (b) photograph of the fabricated guide vane (GV) model. The maximum GV thickness is $H_{\max}/C=0,2206$ at the distance of $x_{\max}/C=0,4396$ from its leading edge. The rounding radius of the leading edge is 1,97 mm, the height of the blunt trailing edge is 1,3 mm

бочий канал; p_v – давление насыщенных паров рабочей жидкости (дистиллированной воды); ρ – плотность рабочей жидкости, путем изменения средне-расходной скорости течения $U_0=Q/[a \cdot (b-h(\alpha))]$, где Q – объемный расход жидкости; $a=80$ мм и $b=250$ мм – ширина и высота рабочего канала; h – высота миделевого сечения лопатки – сечения, в котором проекция крыла на ось y , зависящая от угла атаки α , достигает максимального значения ($h=H_{\max}$ при $\alpha=0^\circ$). Соотношение размеров лопатки (отношение размаха гидропрофиля к его хорде) $a/C=0,8$, что хорошо соответствует некоторым практическим случаям.

Для управления течением исходная геометрия симметричного гидрокрыла была модифицирована таким образом, чтобы сформировать поперечный щелевой канал на одной из его сторон (верхней на рис. 2), являющийся выходным сечением сопла, расположенного внутри НЛ. Рабочая жидкость подавалась из байпасного контура напрямую во внутреннее сопло НЛ и далее через щелевой канал попадала в основной поток. Выходное сечение щелевого сопла высотой $h_n=0,6$ мм и шириной $a_n=70$ мм располагалось на расстоянии $0,6 C$ от передней кромки крыла. Таким образом, инъекция жидкости осуществлялась по всему размаху лопатки за исключением торцевых накладок шириной по 5 мм каждая. Высота обратного уступа, формируемого щелевым каналом и его стенкой, составляла $0,8$ мм. Камера сопла, расположенная внутри НЛ, имела спиралевидную геометрию с сужением к выходу (рис. 1, а). Коэффициент поджатия сопла (отношение площади входного сечения к площади выходного) равен 3,16. Подача жидкости к внутренней камере сопла осуществлялась через трубопровод с внутренним диаметром 13 мм, который пролегал внутри оси НЛ, посредством насоса или за счет существующего градиента давления вдоль байпасного контура. В экспериментах расход жидкости через щелевой канал не превышал $0,7$ л/с,

что соответствовало максимальной скорости пристенной щелевой струи $U_{inj}=16,7$ м/с. Погрешность измерения расхода через щелевой канал составляла 2 %. В байпасном контуре забор жидкости производился выше по течению перед хонейкомбом основного контура экспериментального стенда. При этом жидкость из байпасного контура частично подавалась в рабочий канал, а оставшаяся ее часть возвращалась обратно в стенд перед входом в насосную группу, тем самым полный объем жидкости в стенде не изменялся.

Таблица. Точки образующей поверхности НЛ в различных поперечных сечениях x . y_{up} и y_{down} – поперечные координаты этих точек на верхней (с щелью) и нижней (без щели) поверхностях относительно хорды гидрокрыла (нулевая линия). Толщина НЛ в каждом сечении $H(x)=y_{up}-y_{down}$. Профиль модели НЛ получен путем аппроксимации кубическим сплайном этих значений

Table. Points of the generatrix of GV surface at different cross-sections x . y_{up} and y_{down} are the transversal coordinates of these points at the upper (with slot) and lower (w/o slot) surfaces with respect to the hydrofoil chord (zero line). The GV thickness in every cross-section is $H(x)=y_{up}-y_{down}$. The shape of the GV model is a result of a cubic spline approximation of these values

x/C	y_{up}/C	y_{down}/C
0	0	0
0,1	0,0658	-0,0658
0,2	0,0898	-0,0898
0,3	0,1045	-0,1045
0,4	0,1098	-0,1098
0,5	0,1087	-0,1087
0,6	0,0925/0,0845	-0,0981
0,7	0,0713	-0,0792
0,8	0,0544	-0,0554
0,9	0,0312	-0,0312
1	0,0065	-0,0065

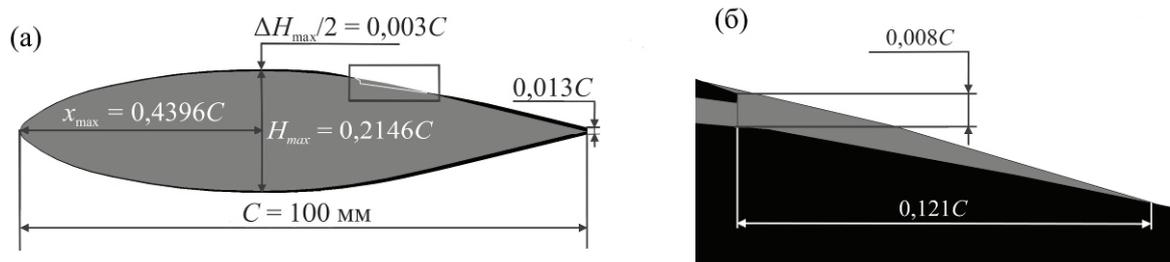


Рис. 2. Сравнение формы модифицированной модели НЛ (показана черным) с геометрией лопатки из работы [19] (изображена серым): (а) во весь размер и (б) увеличенная область вблизи щелевого канала, соответствующая выделенной области на изображении (а)

Fig. 2. Comparison of the shape of the modified GV model (painted black) with the geometry of the GV model from [19] (colored grey): (a) the full-length image and (b) the blow-up of the near-slot region corresponding to the box-shaped area in image (a)

В рамках данной постановки задачи определяющим параметром помимо угла атаки α и числа кавитации σ также является отношение скорости инжектируемой жидкости к скорости набегающего потока U_{inj}/U_0 . Этот параметр отражает способность генерируемой пристенной струи преодолеть положительный градиент давления, для этого $U_{inj}/U_0 \sim 1$. Вместе с тем в научно-технической литературе (например, [17]) для количественной оценки мощности управляющего потока обычно вводят коэффициент импульса струи C_μ , который, по сути, отражает затрачиваемое на генерацию струи количество энергии по отношению к энергии самого течения. В зависимости от параметров течения этот коэффициент может быть представлен в разной форме. В данном исследовании он был задан как отношение подводимого импульса через щелевой канал к импульсу, передаваемому гидрокрылу основным потоком вследствие его перекрытия, согласно следующей формуле:

$$C_\mu = \frac{m_{inj} U_{inj}}{m_0 U_0} = \frac{U_{inj}^2 S_N}{U_0^2 S_M} = \frac{U_{inj}^2 h_N a_N}{U_0^2 ha},$$

где m_{inj} – масса жидкости, истекающей из щелевого сопла с площадью выходного сечения S_N в единицу времени; m_0 – эквивалентная масса жидкости основного течения, которая протекала бы через площадь миделевого сечения крыла S_M в единицу времени в его отсутствие. В настоящей работе C_μ можно считать приблизительно равным $0,024 U_{inj}^2 / U_0^2$ для всех рассматриваемых углов атаки α ввиду их малости.

Динамика и пространственная структура парогазовых каверн, а также их интегральные параметры, такие как длина присоединенной каверны и частота отрыва кавитационных облаков, анализировались с помощью высокоскоростной визуализации двумя CMOS-камерами Photron FASTCAM SA5 (разрядность 12 бит, разрешение 1024×1024 пикселей, частота регистрации 7 кГц) с частотой дискретизации 20 кГц одновременно из двух ортогональных положений – сверху и сбоку. Для равномерной подсветки области возникновения кавитации в качестве непрерывного источника некогерентного света использовались три галогеновые

лампы суммарной мощностью 2,5 кВт. Скорость течения измерялась с помощью PIV системы, состоящей из двойного импульсного твердотельного Nd: YAG-лазера Quantel EVG00200 (длина волны излучения 532 нм, частота генерации импульсов 15 Гц, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 200 мДж), ПЗС-камеры ImperX B2020 (разрядность 14 бит, разрешение 2048×2048 пикселей, частота регистрации 6 Гц), оснащенной объективом Nikon AF Nikkor 50 mm f/1.4D и оптическим фильтром (край полосы пропускания на 570 нм), и генератора сигналов ПОЛИС (8 выходных TTL-каналов, частота повторения пар импульсов 10 Гц, минимальная задержка между импульсами в паре 100 нс) для синхронизации всех компонент измерительного комплекса. Измерительная система управлялась через ПК с применением программного пакета «ActualFlow» [20]. Поскольку в кавитирующем потоке паровые микропузырьки могут серьезно ухудшать качество исходных данных вследствие отражения лазерного излучения в камеру и формирования ярких бликов на изображениях, их негативное влияние на PIV-измерения в существенной степени подавлялось путем добавления в поток флуоресцентных трассеров (дисперсный состав 1–20 мкм, диапазон длин волн перезлучения 550–700 нм). Измерения производились с частотой регистрации 4 Гц. Толщина светового лазерного «ножа», используемого для засветки частиц, составляла 0,8 мм в измерительном сечении, которое совпадало с центральной продольной плоскостью рабочего канала. Расстояние между камерой и лазерным «ножом» было равно 574 мм. Размер измерительной области составлял 124×124 мм.

Исходные данные (серия из 5000 двойных PIV-изображений для каждого режима) подвергались последовательно двум процедурам предварительной обработки: вычитание среднего двухкадрового поля интенсивности, осредненное по всему размеру выборки, для улучшения качества изображений и маскирование для удаления областей, соответствующих положению гидрокрыла, и теней из последующих расчетов. Поля скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреля-

ционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией областей и 75 % перекрытием между ними. На этапе корреляционной обработки изображений также учитывалась локальная концентрация трассирующих частиц. Для получения достаточно большого динамического диапазона по смещению частиц начальный размер расчетной области составлял 64×64 пикселя, но в процессе обработки для увеличения пространственного разрешения она последовательно дробилась, так что конечный размер элементарной расчетной ячейки был равен 8×8 пикселей. Полученные векторные поля мгновенной скорости подвергались последовательно трем процедурам валидации данных: валидация по соотношению сигнал/шум с порогом 2,0, адаптивный медианный фильтр с размером области 7×7 пикселей и кластерная валидация с коэффициентом 50 (детали обработки можно найти в [18]).

Результаты

В данном разделе представлены некоторые результаты экспериментального исследования кавитационного обтекания модифицированной модели НЛ в сравнении с немодифицированным гидрокрылом для углов атаки $\alpha = 3^\circ$ и 9° и нескольких режимов по числам кавитации: однофазный поток, пузырьковая/пленочная кавитация, переходный режим и нестационарная пульсирующая каверна. Сначала рассматривается эффект инъекции на пространственную структуру и размеры кавитационных каверн, зарегистрированный путем высокоскоростной визуализации. Далее приводится сравнение распределений средних скоростей и турбулентных характеристик на примере флуктуационной составляющей продольной компоненты скорости и напряжений Рейнольдса вблизи поверхности гидрокрыла для тех режимов, влияние инъекции на которых наиболее выражено.

Высокоскоростная визуализация

Малый угол атаки

При $\alpha = 3^\circ$ кавитация зарождается на стороне разрежения направляющей лопатки на расстоянии примерно $0,09 C$ от передней кромки в форме отдельных пузырьков, при $\sigma = 0,93$ область кавитации распространяется вниз по потоку до $0,7 C$ (рис. 3, а.2). В случае немодифицированной (стандартной) НЛ область кавитации практически совпадает с кавитационной областью на модифицированном гидрокрыле кроме пристенных зон, где кавитация на стандартном профиле полностью отсутствует (рис. 3, а.1, а.2). Максимальный размер кавитационных пузырей на стандартной НЛ оказывается заметно меньше (2 мм), чем на модифицированном гидрокрыле (7 мм). Это связано с тем, что начальное количество пузырей, а значит, и ядер кавитации в случае модифицированного гидрокрыла по неизвестной причине значительно меньше, чем в случае немодифицированного, поэтому до того, как начать влиять друг на друга, они

успевают достичь гораздо больших размеров, перемещаясь вниз по потоку. С началом инъекции жидкости с относительной скоростью струи $U_{inj}/U_0 = 0,64$ наблюдавшийся исходно переходный режим кавитационного обтекания, характеризующийся наличием большого количества кавитационных пузырей, которые растут вниз по потоку, взаимодействуют друг с другом, сливаются в более крупные структуры, но при достижении области повышенного давления схлопываются с образованием небольших облаков из микроскопических пузырей, переходит в обычную пузырьковую кавитацию (рис. 3, а.3). Как можно видеть, инъекция приводит к резкому сокращению зоны кавитации выше по течению в пределах от $0,09 C$ до $0,6 C$ и уменьшению количества и размера кавитационных пузырей с 7 до 4 мм, что, вероятно, связано с перераспределением давления на поверхности НЛ при инжестировании жидкости. Повышение скорости инжеструемой жидкости до $U_{inj}/U_0 = 1,25$ влечет интенсификацию парообразования (рис. 3, а.4), причем максимальный диаметр кавитационных пузырей, достигающий уже 10 мм, оказывается даже больше, чем при отсутствии инъекции, хотя режим обтекания остается пузырьковым.

Незначительное уменьшение σ до 0,87 приводит к тому, что присоединенная каверна как на модифицированной, так и на стандартной НЛ становится неустойчивой и начинает периодически пульсировать с безразмерной частотой $St = fC/U_0 = 0,17$ в случае свободного (т. е. без инъекции) потока (рис. 3, б.1, б.2). При этом размер зоны кавитации изменяется от нулевого, когда кавитация исчезает полностью, до $0,8 C$, когда каверна достигает максимального размера, а кавитационные пузыри становятся совсем маленькими, не более 2–3 мм в поперечнике (рис. 3, а.1, б.1, б.2). На данном режиме низкоскоростная ($U_{inj}/U_0 < 1$) инъекция жидкости при $U_{inj}/U_0 = 0,73$ позволяет стабилизировать присоединенную каверну (рис. 3, б.3), одновременно с этим уменьшая зону кавитации до $0,65 C$ и увеличивая размер кавитационных пузырей до 8 мм. Таким образом, режим обтекания НЛ становится переходным, подобным тому, который представлен на рис. 3, а.2. Стоит заметить, что значение коэффициента C_{μ} в данном случае составляет всего лишь 0,013, что говорит о малости затрачиваемой энергии, используемой для управления течением, по сравнению с энергией самого течения. Увеличение U_{inj}/U_0 до 1,27 (рис. 3, б.4) уже не приводит к изменению режима кавитационного обтекания, он остается переходным, но несколько интенсифицирует парообразование (визуально это проявляется как расширение кавитационной области и увеличение концентрации паровой фазы в ней) и уменьшает размер пузырей до 4 мм. Следовательно, низкоскоростная инъекция на малых углах атаки оказывается более эффективной, чем высокоскоростная. При дальнейшем уменьшении числа кавитации σ до 0,81 активное воздействие больше не меняет картину течения (рис. 3, в.2, в.3, в.4), ка-

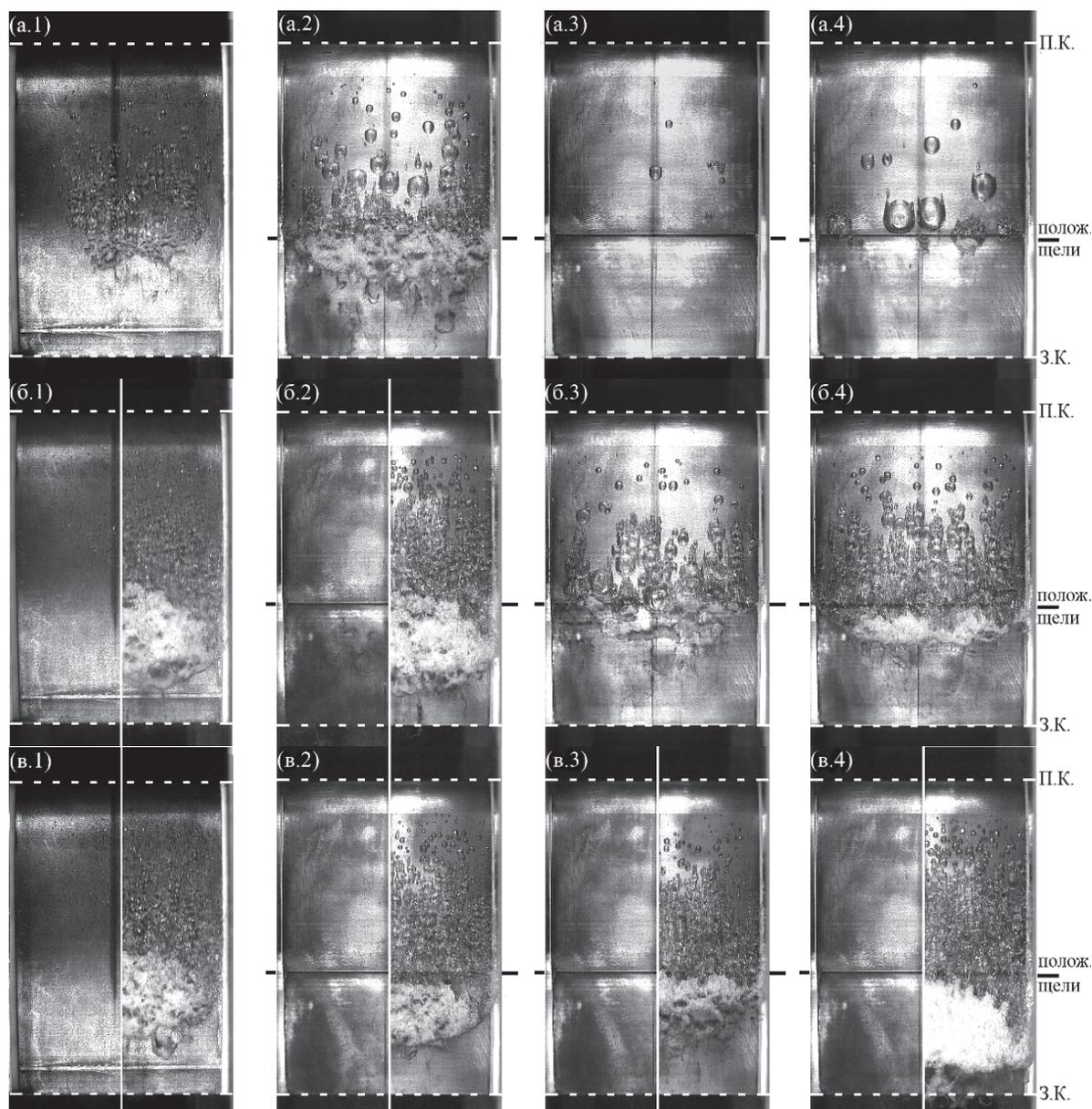


Рис. 3. Фотографии частичных каверн (вид сверху), возникающих на стороне разрежения (1) немодифицированной (без щели) и (2, 3, 4) модифицированной модели направляющей лопатки при $\alpha=3^\circ$ для следующих режимов обтекания: (а) $\sigma=0,93$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_\mu=0,038$) (переходный режим/пузырьковая кавитация), (б) $\sigma=0,87$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_\mu=0,013$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,27$ ($C_\mu=0,039$) (нестационарная каверна/переходный режим) и (в) $\sigma=0,81$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_\mu=0,013$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_\mu=0,037$) (нестационарная каверна). Для нестационарных режимов обтекания на одном изображении представлены половины фотографий для двух фаз развития присоединенной каверны, когда она имеет (левая) минимальную (в тот момент времени, по прошествии которого каверна начинает расти) и (правая) максимальную длину (как раз перед разрывом межфазной границы каверны). Направление потока сверху вниз

Fig. 3. Photographs of the partial cavities (top view) occurring on the suction side of the (1) unmodified (without the slot) and (2, 3, 4) modified guide vane model at $\alpha=3^\circ$ for the following flow conditions: (a) $\sigma=0,93$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_\mu=0,037$) (transitional regime/traveling bubbles), (b) $\sigma=0,87$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_\mu=0,013$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,27$ ($C_\mu=0,039$) (unsteady cavity/transitional regime) and (c) $\sigma=0,81$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_\mu=0,013$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_\mu=0,037$) (unsteady cavity). For the unsteady flow conditions, half images indicating two phases of the attached cavity evolution when it has (left) the shortest (at the moment whereupon the cavity starts to grow) and (right) longest length (just before the cavity interface breakup) are shown together in the same picture. The flow direction is from the top

верна остается нестационарной ($St=0,17$), хотя размер зоны кавитации немного уменьшается с $0,8 C$ до $0,7 C$ для $U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_\mu=0,013$) и увеличивается до $0,9 C$ для $U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_\mu=0,037$).

Большой угол атаки

При большом угле атаки $\alpha=9^\circ$ при отсутствии инъекции кавитация зарождается сразу за передней кромкой НЛ в виде паровой пленки. При $\sigma=2,24$ длина присоединенной каверны $L_c/C=0,13$ для обоих гидрокрыльев, стандартного и модифицированного (рис. 4, а.1, а.2). С началом инъекции длина присоединенной каверны быстро уменьшается по мере роста скорости инжектируемой жидкости и полностью исчезает при $U_{inj}/U_0=0,04$ ($C_\mu=4 \cdot 10^{-5}$) (рис. 4, а.3). Такую высокую чувствительность каверны к инъекции и ее anomальное поведение на данном режиме в рамках данного исследования полностью объяснить не представляется возможным, требуются дополнительные дан-

ные о колебаниях давления в камере сопла, информация о распределении давления на поверхности лопаток, скоростная визуализация развития пристенной струи и другие. Это выходит за рамки данной работы, поэтому здесь приводится лишь описание наблюдаемых эффектов и некоторые рассуждения феноменологического характера. Весьма вероятно, что такой характер изменения длины каверны при малых расходах через щель связан с периодическим запираем инжекционного потока в сопле при малых расходах, то есть происходит переход к так называемому пульсирующему режиму истечения струи. Это приводит к генерации волн давления/разрежения, которые, распространяясь вверх по потоку, нарушают стационарные условия течения вблизи передней кромки крыла, необходимые для зарождения присоединенной каверны [10], и тем самым препятствует ее образованию, что косвенно подтверждается увеличением амплитуды турбулентных флуктуаций скорости (следующий подраздел).

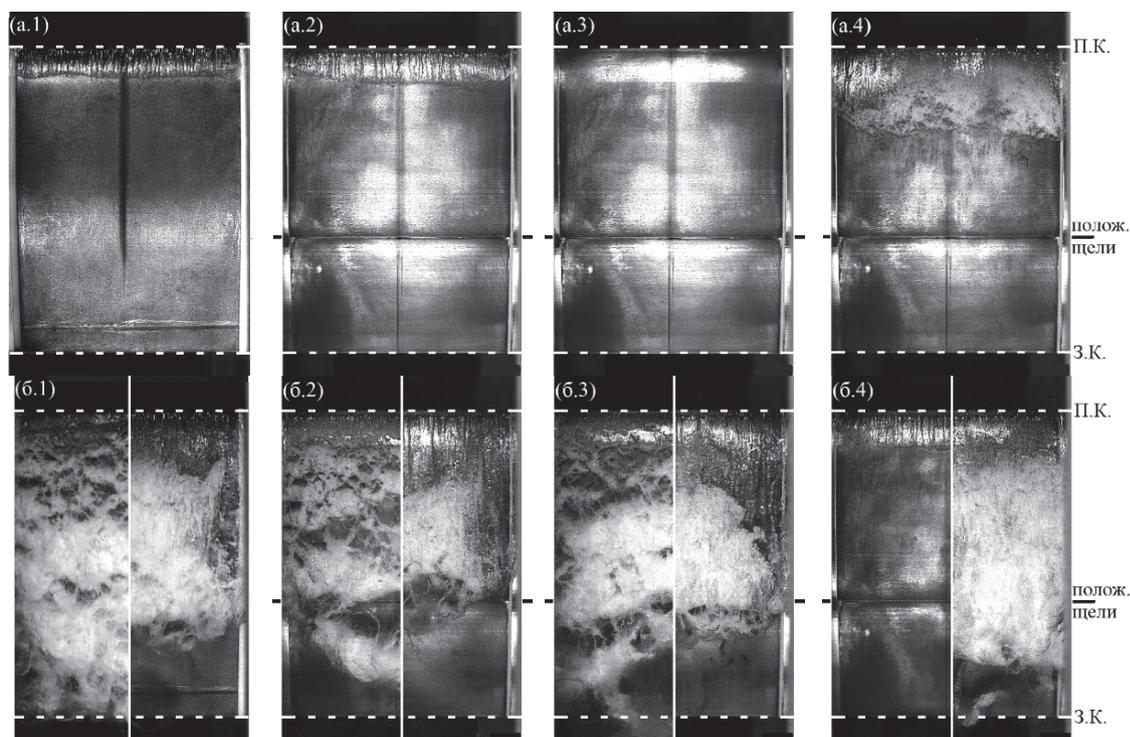


Рис. 4. Фотографии частичных каверн (вид сверху), возникающих на стороне разрежения (1) немодифицированной (без щели) и (2, 3, 4) модифицированной модели направляющей лопатки при $\alpha=9^\circ$ для следующих режимов обтекания: (а) $\sigma=2,24$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (пленочная каверна/докавитационный режим) и (б) $\sigma=1,57$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (нестационарная каверна). Для нестационарных режимов обтекания на одном изображении представлены половины фотографий для двух фаз развития присоединенной каверны, когда она имеет (левая) минимальную (в тот момент времени, по прошествии которого каверна начинает расти) и (правая) максимальную длину (непосредственно перед разрывом межфазной границы каверны). Направление потока сверху вниз

Fig. 4. Photographs of the partial cavities (top view) occurring on the suction side of the (1) unmodified (without the slot) and (2, 3, 4) modified guide vane model at $\alpha=9^\circ$ for the following flow conditions: (a) $\sigma=2,24$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (sheet cavity/subcavitating flow) and (b) $\sigma=1,57$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (unsteady cavity). For the unsteady flow conditions, half images indicating two phases of the attached cavity evolution when it has (left) the shortest (at the moment whereupon the cavity starts to grow) and (right) longest length (just before the cavity interface breakup) are shown together in the same picture. The flow direction is from the top

Дальнейший рост скорости инъекции не меняет картины течения до тех пор, пока не достигается порогового значения $U_{inj}/U_0=0,7$ ($C_\mu=0,011$). При его достижении пленочная каверна появляется снова, а ее длина возрастает по мере увеличения подводимого импульса: при $U_{inj}/U_0=1,07$ ($C_\mu=0,027$) (не показано) и $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,057$) (рис. 4, а,4), $L_c/C=0,28$ и $0,4$ соответственно. По-видимому, такой скорости инжектирования оказывается достаточно, чтобы запираания потока через щель больше не происходило, а условия обтекания гидрокрыла стали постоянными. Вместе с тем известно [21], что источник, расположенный ниже по течению за каверной, приводит к сокращению длины каверны, а сток – к ее удлинению. В данном случае струя жидкости со скоростью ниже локальной скорости течения вблизи поверхности подтормаживает основной поток вблизи места истечения струи и может служить аналогом источника. Замедление течения, в свою очередь, приводит к повышению локального давления и, следовательно, вызывает перераспределение давления на всей поверхности НЛ, что и вызывает уменьшение длины каверны или полное ее исчезновение. Струя же, имеющая скорость выше локальной, ускоряет слой жидкости, лежащие перед щелью, за счет эжекции подобно стоку. Таким образом, высокоскоростная инъекция вызывает снижение давления в области расположения щели и, как следствие, приводит к росту каверны.

В случае нестационарной облачной кавитации при $\sigma=1,57$ (характерное число Струхала $St=0,43$) инъекция не позволяет эффективно воздействовать на кавитацию и хотя бы отчасти сократить длину присоединенной каверны (рис. 4, б). Напротив, она приводит к увеличению каверны: без инъекции минимальная и максимальная длина каверны L_c^{max}/C и L_c^{min}/C составляют 0,56 и 0,05 соответственно (рис. 4, б-2), для $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,018$) $L_c^{max}/C=0,68$ и $L_c^{min}/C=0,03$ (рис. 4, б-3) и для $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) $L_c^{max}/C=0,83$ и $L_c^{min}/C=0,08$ (рис. 4, б-4). Так как каверна накрывает щелевое сопло, описывать влияние пристенной струи на каверну по аналогии с источником-стоком нельзя. Постепенное удлинение каверны с ростом скорости инжектирования, вероятно, связано с увеличением эффективной толщины гидрокрыла ниже по потоку относительно щели за счет пристенной струи и, как следствие, постепенным уменьшением скачка давления на щели с ростом U_{inj}/U_0 . Так происходит потому, что поперечный размер пристенного слоя, подпитываемого дополнительным импульсом, на больших углах атаки оказывается существенно меньше толщины кавитационной каверны, вследствие чего возвратное течение, являющееся причиной неустойчивости каверны, продолжает существовать над пристенной струей. В случае без инъекции скачок давления на щели не позволяет развиться каверне ниже по потоку относительно положения щели.

Распределения скорости

На рис. 5 и 6 представлены распределения продольной компоненты осредненной по времени скорости в виде дефекта скоростей $(U-U_0)/U_0$, продольной компоненты флуктуационной составляющей скорости \tilde{u}/U_0 (среднеквадратичные значения) и напряжений Рейнольдса $\langle uv \rangle / U_0^2$ в нескольких поперечных относительно направления течения сечениях вдоль образующей поверхности гидрокрыла, спроецированной на его хорду. Таким образом, ось x получается направленной вдоль течения вне зависимости от угла атаки α , а ось y всегда перпендикулярна направлению течения, но в каждом сечении $y/C=0$ соответствует точке на верхней (с щелью) поверхности НЛ. Начало координат ($x/C=0$; $y/C=0$) соответствует положению передней кромки НЛ в измерительной плоскости при угле атаки $\alpha=0^\circ$. Щелевой канал находится в точке ($x/C=0,6$; $y/C=0$). Для облегчения прямого сравнения профили представлены вместе для обеих модификаций НЛ и разных U_{inj}/U_0 на всех рассматриваемых режимах. Характерные межфазные границы присоединенных каверн, полученные из визуальных данных, отображены на графиках в виде пунктирных линий для различных скоростей инъекции. Как и ожидалось, инъекция практически не оказывает влияния на профили как средней и флуктуационной компонент скорости, так и напряжений Рейнольдса выше по течению относительно положения щелевого канала (профили в сечениях $x/C=0,1$ и $0,4$ на рис. 5, 6). Данный факт подтверждает сделанный ранее вывод по визуальным данным, что взаимодействие кавитационной каверны и пристенной струи выше по течению относительно положения щели происходит только за счет изменения локального поля давления и не зависит от распределений скоростных характеристик.

Малый угол атаки

В докавитационном случае ($\sigma=1,26$) при $\alpha=3^\circ$ интенсивность турбулентных флуктуаций скорости в пограничном слое неожиданно оказывается выше более чем на 60 % для стандартной НЛ ($\tilde{u}/U_0=0,176$ в точке $x/C=1$, $y/C=0,023$), чем для модифицированной без инъекции ($\tilde{u}/U_0=0,108$ в той же точке) (рис. 5, б.1), хотя модифицированное крыло имеет, очевидно, менее обтекаемую форму. Судя по всему, данное обстоятельство обусловлено различием геометрии задней части двух лопаток (рис. 2, а). В самом деле, для модифицированного гидрокрыла после отрыва пограничного слоя при прохождении обратного уступа, формируемого щелью и поверхностью НЛ, происходит повторное его присоединение ниже по течению. Однако вследствие того, что толщина задней кромки для модифицированной НЛ оказывается больше (между сечениями $x/C=0,721$ и 1 , рис. 2), а, следовательно, неблагоприятный градиент давления в данной области меньше, турбулициация пограничного слоя на ней происходит медленнее.

Малая скорость инжекции $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) приводит к заметному увеличению модуля дефекта средней скорости вблизи задней кромки крыла ($x/C=1$) до $|(U-U_0)/U_0|=0,85$ по сравнению с безынекционным случаем ($|(U-U_0)/U_0|=0,59$), так что их разница $\Delta U/U_0=0,26$ (рис. 5, а.1), хотя толщина пограничного слоя не изменяется и составляет приблизительно $0,05C$. Вместе с тем при инжекции происходит более чем двукратный рост турбулентных флуктуаций скорости в том же поперечном сечении до $\tilde{u}/U_0=0,23$ на расстоянии $y/C=0,024$ от поверхности НЛ (рис. 5, б.1), причем вблизи стенки их амплитуда изменяется не столь значительно. Аналогично ведут себя и касательные напряжения, увеличиваясь более чем в два раза на расстоянии $y/C=0,024$ от поверхности НЛ и практически совпадая на стенке в случае инжектирования с малой скоростью (рис. 5, в.1). Увеличение скорости инжекции до $U_{inj}/U_0=1,32$ ($C_\mu=0,042$) влечет за собой изменение пространственных распределений скоростных характеристик, так что они становятся более равномерными по сравнению со случаем без инжекции. В сечении $x/C=1$ $|(U-U_0)/U_0$ уменьшается с $0,61$ до $0,32$ вблизи поверхности НЛ (рис. 5, а.1), а интенсивность турбулентных флуктуаций скорости и амплитуда напряжений Рейнольдса падают почти в два раза в пределах пограничного слоя (рис. 5, б.1, в.1).

На переходном режиме ($\sigma=0,93$) в случае стандартной НЛ распределения скоростных характеристик слабо отличаются от докавитационного случая. Однако для модифицированной НЛ происходят существенные изменения в распределениях средних и турбулентных характеристик вблизи стенки даже для невозмущенного потока (без инжекции). Так, увеличивается толщина пограничного слоя с $0,03C$ в сечении $x/C=0,7$ и $0,06C$ при $x/C=1$ (докавитационный поток, рис. 5, а.1) до $0,04C$ и $0,09C$ соответственно в тех же сечениях (рис. 5, а.2). Средняя скорость оказывается заметно меньше в пристенной области ($y/C<0,05$) в сравнении с докавитационным режимом, так что ее минимум достигает $U^{\min}/U_0=0,43$ при $x/C=0,7$ и $U^{\min}/U_0=0,28$ при $x/C=1$. Турбулентные флуктуации одновременно с этим возрастают в пределах пограничного слоя до $\tilde{u}/U_0=0,21$ ($x/C=0,7$) и $0,17$ ($x/C=1$) (рис. 5, б.2). Напряжения Рейнольдса предсказуемо остаются отрицательными, но возрастают по амплитуде в пределах пограничного слоя до $\langle uv \rangle / U_0^2 = -0,022$ ($x/C=0,7$) и $-0,01$ ($x/C=1$) (рис. 5, в.2).

Как уже отмечалось ранее, инжекция с малой скоростью $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) на данном режиме течения вызывает изменение типа кавитации на пузырьковый (рис. 3, а.2, а.3). При этом в сравнении с безынекционным случаем происходит сокращение толщины пограничного слоя до $0,025C$ ($x/C=0,7$) и $0,05C$ ($x/C=1$) (рис. 5, а.2), смещение максимума флуктуаций скорости и минимума напряжений Рейнольдса от $y/C=0,015$ в сече-

нии $x/C=0,7$ к поверхности ($y/C=0$) и уменьшение их амплитуды до $\tilde{u}/U_0=0,12$ и $\langle uv \rangle / U_0^2 = -0,005$ (рис. 5, б.2, в.2). При $x/C=1$ соответствующие максимум и минимум также оказываются рядом с поверхностью, но их значения остаются практически такими же, как и в случае без инжекции: $\tilde{u}/U_0=0,2$ и $\langle uv \rangle / U_0^2 = -0,01$ (рис. 5, б.2, в.2). Эффект увеличения скорости инжекции до $U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_\mu=0,038$) оказывается совсем незначительным в сечении $x/C=0,7$ в сравнении с предыдущим случаем. Однако в то же время в сечении $x/C=1$ увеличение U_{inj}/U_0 приводит к уменьшению модуля дефекта скорости у поверхности НЛ с $|(U-U_0)/U_0|=0,92$ для немодифицированного гидрокрыла до $0,45$, а также падению уровня турбулентных флуктуаций скорости и касательных напряжений в точке ($x/C=1; y/C=0,03$) более чем в два раза.

В случае нестационарного кавитационного обтекания при $\sigma=0,87$ (рис. 5, а.3) и $\sigma=0,81$ (рис. 5, а.4) толщина пограничного слоя для всех рассматриваемых случаев возрастает до $0,05C$ при $x/C=0,7$ и $0,11C$ при $x/C=1$. Причем подвод дополнительного импульса не оказывает влияния на поперечный размер пограничного слоя, но приводит к некоторому уменьшению средней скорости внутри него, особенно при слабой инжекции $U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_\mu=0,013$). В результате вблизи стенки U/U_0 уменьшается на $0,4$ при $x/C=0,7$ и $0,1$ при $x/C=1$ для $\sigma=0,87$ и на $0,21$ и $0,15$ в тех же сечениях для $\sigma=0,81$ (рис. 5, а.3, а.4). Тем не менее, в целом можно констатировать, что при переходе к нестационарным режимам обтекания распределения средней скорости для стандартной и модифицированной НЛ близки (рис. 5, а.3, а.4), однако этого нельзя сказать о турбулентных характеристиках (рис. 5, б.3, б.4, в.3, в.4).

Так, при $\sigma=0,87$ в случае модифицированной лопатки без инжекции амплитуда флуктуаций скорости оказывается больше ($\tilde{u}/U_0=0,22$ при $x/C=1$), чем для стандартной НЛ с острой задней кромкой и модифицированной НЛ с инжекцией ($\tilde{u}/U_0 \approx 0,15$) в том же сечении (рис. 5, б.3). В такой ситуации инжекция позволяет лишь приблизиться к характеристикам для немодифицированной НЛ, но не превзойти их. Тем не менее, на этом режиме инжекция оказывается достаточно, чтобы изменить распределение давления на поверхности лопатки и, тем самым, инициировать возврат к стационарному режиму течения (рис. 3, б.3, б.4). При $\sigma=0,81$ инжекция не позволяет даже хоть сколько-нибудь близко подойти к распределениям вблизи стандартной НЛ, эффект инжекции на данном режиме также не просматривается и на визуальных данных (рис. 3, в.3, в.4). Для немодифицированного крыла $\tilde{u}/U_0=0,12$ в сечении $x/C=1$, тогда как для гидропрофиля с щелью $\tilde{u}/U_0=0,18$ независимо от скорости инжекции (рис. 5, б.4). Распределения напряжений Рейнольдса в целом повторяют с точностью до знака динамику интенсивности турбулентности (рис. 5, в.4).

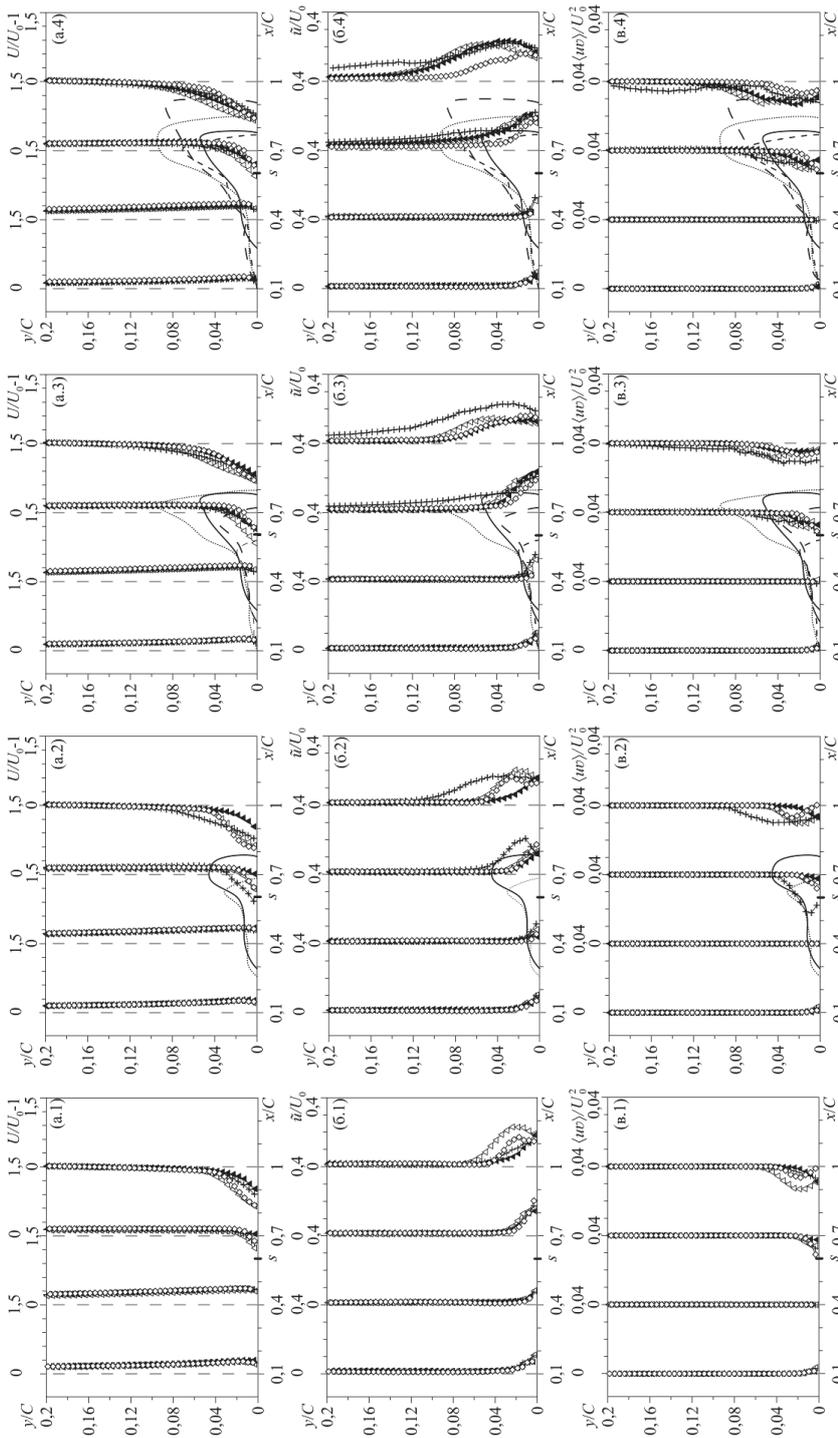


Рис. 5. Эволюция продольной составляющей (а) средней скорости (в виде дефекта скорости) и (б) интенсивности турбулентности (среднеквадратичные значения) и (в) напряжений Рейнольдса вниз по потоку со стороны разрежения лопасти направляющей модели направляющей лопасти при $\alpha=3^\circ$ для следующих режимов обтекания: (1) $\sigma=1,26$ при $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_{ti}=0,01$) и $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,32$ ($C_{ti}=0,042$) (докавитационный режим), (2) $\sigma=0,93$ при $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_{ti}=0,01$) и $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_{ti}=0,038$) (переходный режим/пузырьковая кавитация), (3) $\sigma=0,87$ при $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_{ti}=0,013$) и $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,27$ ($C_{ti}=0,039$) (нестационарная каверна/переходный режим) и (4) $\sigma=0,81$ при $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_{ti}=0,013$) и $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_{ti}=0,037$) (нестационарная каверна). Символы (\blacklozenge) соответствуют безынекциионному случаю, (\diamond) показывают распределение для немодифицированной НЛ. Сплошная и пунктирные линии отображают межфазные границы присоединенных каверн максимального размера: точки (.....) – $U_{inj}/U_0=0$ для всех режимов, на которых существует каверна, короткие штрихи (---) – $U_{inj}/U_0=0,73$ и $0,74$ ($C_{ti}=0,013$) при $\sigma=0,87$ и $0,81$, длинные штрихи (---) – $U_{inj}/U_0=1,27$ и $1,24$ ($C_{ti}=0,039$ и $0,037$) при $\sigma=0,87$ и $0,81$, сплошная линия (—) соответствует НЛ без модификации. s обозначает положение щелевого канала на поверхности гидрокрыла. Направление потока слева направо

Fig. 5. Downstream evolution of the streamwise component of (a) the mean velocity (in the form of velocity defect), (б) turbulence intensity (r.m.s. values) and (в) the Reynolds stresses over the suction side of the guide vane model at $\alpha=3^\circ$ for the following flow conditions: (1) $\sigma=1,26$ when $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_{ti}=0,01$) and $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,32$ ($C_{ti}=0,042$) (subcavitating flow), (2) $\sigma=0,93$ when $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_{ti}=0,01$) and $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_{ti}=0,038$) (transitional regime/traveling bubbles), (3) $\sigma=0,87$ when $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_{ti}=0,013$) and $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,27$ ($C_{ti}=0,039$) (unsteady cavity/transitional regime) and (4) $\sigma=0,81$ when $(\Delta) U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_{ti}=0,013$) and $(\blacktriangle) U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_{ti}=0,037$) (unsteady cavity). Symbols (\blacklozenge) correspond to the regime without injection, (\diamond) show the distributions for the GV without modification. The solid and broken curves represent interfaces of the sheet cavities when they reach their maximum size: dots (.....) – $U_{inj}/U_0=0$ for all the regimes when the cavity exists, short dashes (---) – $U_{inj}/U_0=0,73$ and $0,74$ ($C_{ti}=0,013$) when $\sigma=0,87$ and $0,81$, long dashes (---) – $U_{inj}/U_0=1,27$ and $1,24$ ($C_{ti}=0,039$ and $0,037$) when $\sigma=0,87$ and $0,81$, solid line (—) corresponds to the unmodified GV. s denotes the position of the slot channel in the foil surface. The flow direction is from the left

Большой угол атаки

Как и для угла атаки в 3° , при $\alpha=9^\circ$ в случае докавитационного потока ($\sigma=2,83$) (рис. 6, а.1, б.1, в.1) и при пленочной кавитации ($\sigma=2,24$) (рис. 6, а.2, б.2, в.2) инъекция жидкости с малыми $U_{inj}/U_0=0,21$

($C_\mu=0,001$) и высокими $U_{inj}/U_0=1,66$ ($C_\mu=0,066$) и $1,55$ ($C_\mu=0,058$) скоростями приводит соответственно к повышению и снижению интенсивности турбулентности в пограничном слое. В то же время выше было показано, что высокоскоростная ин-

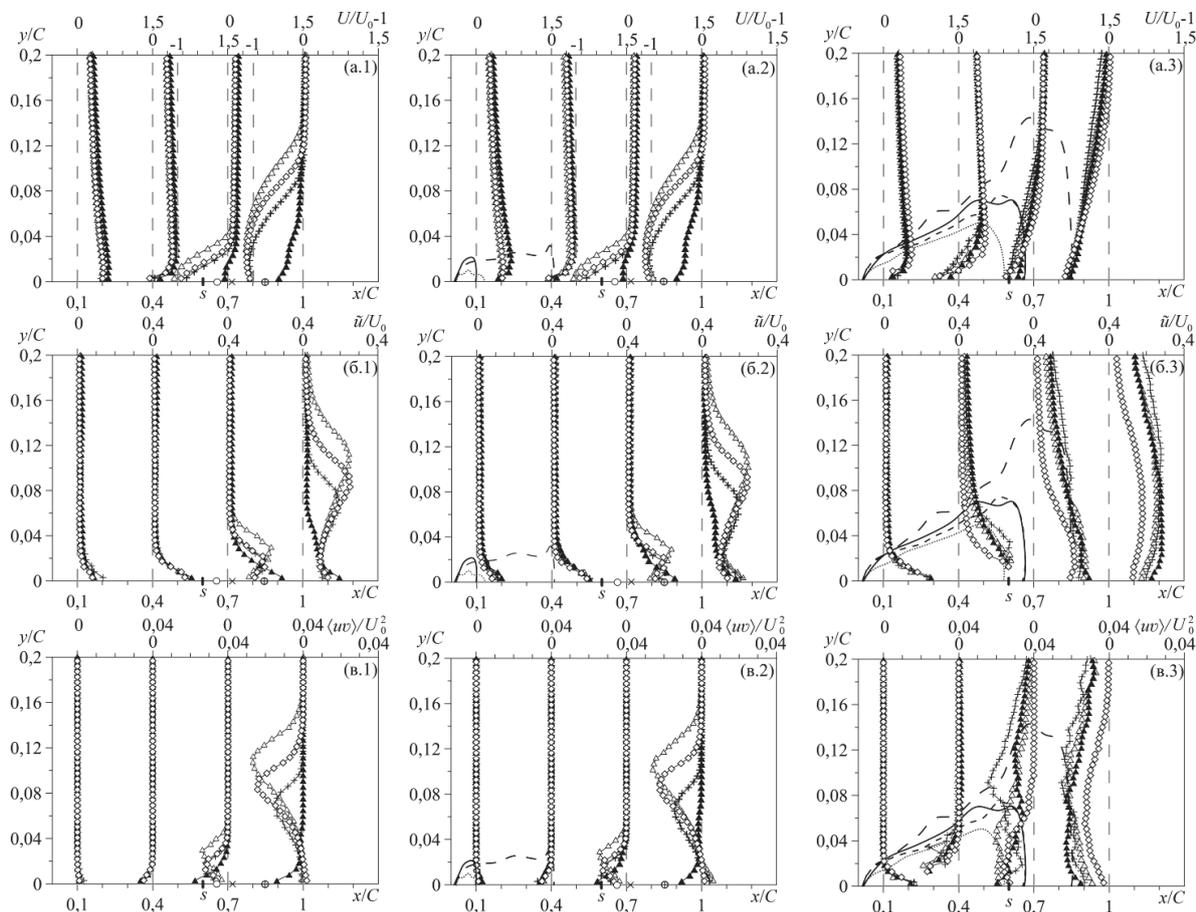


Рис. 6. Эволюция продольной составляющей (а) средней скорости (в виде дефекта скорости), (б) интенсивности турбулентности (среднеквадратичные значения) и (в) напряжений Рейнольдса вниз по потоку со стороны разрежения модели направляющей лопатки при $\alpha=9^\circ$ для следующих режимов обтекания: (1) $\sigma=2,83$ при (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) и (\blacktriangle) $U_{inj}/U_0=1,66$ ($C_\mu=0,066$) (докавитационный режим), (2) $\sigma=2,24$ при (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) и (\blacktriangle) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (пленочная каверна/докавитационный режим) и (3) $\sigma=1,57$ при (Δ) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) и (\blacktriangle) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (нестационарная каверна). Символы (\circ) соответствуют безынекции случаю, (\diamond) показывают распределения для немодифицированной НЛ. Сплошная и пунктирные линии отображают межфазные границы присоединенных каверн максимального размера: точки (.....) - $U_{inj}/U_0=0$ для всех режимов, на которых существует каверна, короткие штрихи (---) - $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) при $\sigma=1,57$, длинные штрихи (----) - $U_{inj}/U_0=1,55$ и $1,42$ ($C_\mu=0,058$ и $0,048$) при $\sigma=2,24$ и $1,57$, сплошная линия (—) соответствует НЛ без модификации. Положения отрыва потока отмечены символом (\otimes) при $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$) и (\circ) при $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) для $\sigma=2,83$ и $2,24$, символ (\blacksquare) соответствует положению отрыва на аналогичных режимах для немодифицированной НЛ. s обозначает положение щелевого канала на поверхности гидрокрыла. Направление потока слева направо

Fig. 6. Downstream evolution of the streamwise component of (a) the mean velocity (in form of the velocity defect), (b) turbulence intensity (r.m.s. values) and (c) the Reynolds stresses over the suction side of the guide vane model at $\alpha=9^\circ$ for the following flow conditions: (1) $\sigma=2,83$ when (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) and (\blacktriangle) $U_{inj}/U_0=1,66$ ($C_\mu=0,066$) (subcavitating flow), (2) $\sigma=2,24$ when (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) and (\blacktriangle) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (sheet cavity/subcavitating flow) and (3) $\sigma=1,57$ when (Δ) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) and (\blacktriangle) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (unsteady cavity). Symbols (\circ) correspond to the regime without injection, (\diamond) show the distributions for the GV without modification. The solid and broken curves represent interfaces of the sheet cavities when they reach their maximum size: dots (.....) - $U_{inj}/U_0=0$ for all the regimes when the cavity exists, short dashes (---) - $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) when $\sigma=1,57$, long dashes (----) - $U_{inj}/U_0=1,55$ and $1,42$ ($C_\mu=0,058$ and $0,048$) for $\sigma=2,24$ and $1,57$, solid line (—) corresponds to the unmodified GV. The location of flow separation is marked by symbol (\otimes) when $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$) and (\circ) when $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) for $\sigma=2,83$ and $2,24$, symbol (\blacksquare) corresponds to similar regimes for the unmodified GV. s denotes the position of the slot channel in the foil surface. The flow direction is from the left

жекция оказывается неэффективной для подавления кавитации (рис. 4). Ранее в работе [19] было обнаружено, что при угле атаки $\alpha=9^\circ$ на стандартной НЛ происходит отрыв потока от ее поверхности в сечении $x/C=0,72$. Отрыв пограничного слоя для модифицированной НЛ без инжекции располагается ниже по течению при $x/C=0,85$ вследствие различия задних частей двух гидрокрыльев. Высокоскоростная инжекция, как оказалось, позволяет сдвинуть точку отрыва потока к задней кромке НЛ, тогда как низкоскоростная инжекция смещает отрыв в обратную сторону, вверх по потоку до $x/C=0,66$. Возвратное течение можно распознать на тех графиках, где дефект скорости $(U-U_0)/U_0 < -1$ (рис. 6, а.1, а.2).

Отрыв пограничного слоя существенно изменяет структуру потока над поверхностью НЛ. Для низко- и высокоскоростной инжекции происходит расширение и сужение пограничного слоя соответственно. Например, вблизи задней кромки НЛ ($x/C=1$) его ширина становится равной 0,14C и 0,07C, тогда как в невозмущенном случае она равняется 0,1C (рис. 6, а.1, а.2). При $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) амплитуда турбулентных флуктуаций и напряжений Рейнольдса в том же сечении увеличивается с $\tilde{u}/U_0=0,19$ на расстоянии от поверхности $y/C=0,07$ (невозмущенный поток) до $\tilde{u}/U_0=0,25$ и с $\langle u\nu \rangle/U_0^2=-0,015$ до $-0,026$, а положение этого максимума и минимума смещается дальше от крыла ($y/C=0,11$). И, наоборот, при $U_{inj}/U_0=1,66$ и 1,55 ($C_\mu=0,066$ и 0,058) амплитуды \tilde{u}/U_0 и $\langle u\nu \rangle/U_0^2$ соответственно уменьшаются до 0,02 и 0,001 при $y/C=0,11$, а их максимум ($\tilde{u}/U_0=0,19$) и минимум ($\langle u\nu \rangle/U_0^2=-0,014$) достигаются вблизи самой кромки НЛ ($y/C=0,005$) (рис. 6, б.1, б.2, в.1, в.2). Несмотря на то, что низкоскоростная инжекция приводит к интенсификации турбулентности в пограничном слое вследствие, как говорилось выше, перехода пристенной струи в пульсирующий режим, она позволяет полностью подавить кавитацию вблизи передней кромки крыла (рис. 4, а).

В случае облачной кавитации (рис. 4, б) при $\sigma=1,57$ ни форма гидрокрыла, ни инжектирование жидкости не оказывают выраженного влияния на графики средней скорости течения (рис. 6, а.3). Однако отличие заметно в распределениях турбулентных характеристик для модифицированной и стандартной НЛ. Амплитуда турбулентных пульсаций и напряжений Рейнольдса оказывается примерно в полтора–два раза ниже для немодифицированного гидрокрыла ($\tilde{u}^{max}/U_0=0,17$ и $\langle u\nu \rangle^{max}/U_0^2=-0,013$), чем для НЛ со щелью при различных условиях инжектирования ($\tilde{u}^{max}/U_0=0,26$ и $\langle u\nu \rangle^{max}/U_0^2=-0,017$). Это подтверждает вывод, полученный из визуальных наблюдений, о том, что на режиме облачной кавитации инжекция почти не изменяет картину кавитационного обтекания. Следовательно, на нестационарных режимах при относительно больших углах атаки данный метод активного управления динамикой кавитационных каверн является неэффективным.

Заключение

В проведенном с помощью высокоскоростной визуализации и метода PIV исследовании была экспериментально изучена возможность и представлена оценка эффективности метода активного управления кавитирующим потоком, основанном на непрерывной тангенциальной инжекции жидкости через поперечный щелевой канал в поверхности уменьшенной модели НЛ высоконапорной турбины. Эксперименты были проведены для различных режимов обтекания, начиная с докавитационного и заканчивая нестационарными режимами с развитой кавитационной каверной, при трех углах атаки $\alpha=0, 3$ и 9 градусов. Коэффициент импульса струи C_μ в данной работе не превышал 0,066, что говорит о малости затрачиваемой энергии, используемой для управления течением, по сравнению с энергией основного потока. В частности в исследовании особое внимание было уделено влиянию инжекции на зарождение и развитие кавитации, а также изменению пространственной структуры присоединенной каверны и режима кавитационного обтекания вследствие генерации пристенной струи с разными скоростями U_{inj}/U_0 . Прямое сравнение измеренных распределений средней скорости и турбулентных характеристик на примере флуктуационной компоненты скорости и напряжений Рейнольдса в окрестности модели НЛ с щелью и немодифицированной модели НЛ с острой задней кромкой позволило выявить ряд особенностей данных течений, связанных с различием формы гидрокрыльев и инжектированием жидкости вдоль поверхности с разной скоростью.

Инжекция, как было продемонстрировано, не оказывает влияния на профили как средних, так и турбулентных характеристик выше по течению относительно положения щелевого канала независимо от режима кавитационного обтекания и угла атаки. Из этого следует вывод, что взаимодействие кавитационной каверны и пристенной струи выше по течению относительно положения щели происходит только за счет изменения локального поля давления. В докавитационном случае интенсивность турбулентных флуктуаций скорости в пограничном слое за щелью неожиданно оказывается заметно выше для стандартной НЛ (без модификации), чем для модифицированной НЛ без инжекции, хотя модифицированное крыло имеет, очевидно, менее обтекаемую форму. Судя по всему, данное обстоятельство обусловлено различием формы задней части двух лопаток. При инжектировании жидкости с малой скоростью ($U_{inj}/U_0 < 1$) происходит значительный рост амплитуды турбулентных флуктуаций скорости и напряжений Рейнольдса. С повышением скорости инжектируемой жидкости до $U_{inj}/U_0 > 1$ пространственные распределения скоростных характеристик, наоборот, становятся более равномерными по сравнению со случаем без инжекции. Так, интенсивность турбулентности и амплитуда касательных напряжений падают почти в два раза по сравнению с безынкек-

ционным случаем. Уменьшение значений как флуктуационной составляющей скорости, так и касательных напряжений в абсолютном выражении свидетельствует о снижении лобового сопротивления гидрокрыла.

На стационарных режимах кавитационного обтекания в случае стандартной НЛ распределения скоростных характеристик слабо отличаются от докавитационного течения. Однако вблизи модифицированной НЛ происходят существенные изменения в распределениях средних и турбулентных характеристик даже для невозмущенного потока (без инжекции): увеличивается толщина пограничного слоя и растет амплитуда турбулентных флуктуаций и касательных напряжений. С началом инжекции жидкости ($U_{inj}/U_0 < 1$) кавитация становится менее развитой, а также может изменяться режим кавитационного обтекания НЛ. При этом происходит резкое сокращение зоны кавитации выше по течению и уменьшение количества и размера кавитационных пузырей, либо происходит вообще полное подавление парообразования. Это, скорее всего, обусловлено перераспределением давления на поверхности лопатки. При этом, как правило, происходит рост турбулентных флуктуаций скорости и касательных напряжений в абсолютном выражении ниже по течению относительно щели, во всяком случае, они никогда не становятся меньше, чем в случае стандартного гидрокрыла. Повышение скорости инжектируемой жидкости до $U_{inj}/U_0 > 1$, наоборот, несколько интенсифицирует парообразование по сравнению со случаем слабой инжекции, а не способствует дальнейшему подавлению кавитации, как можно было бы ожидать, хотя режим обтекания остается прежним. Вместе с тем было обнаружено, что амплитуда турбулентных характеристик в пределах пограничного слоя падает.

Кроме того, на некоторых нестационарных режимах, главным образом при малых углах атаки, низкоскоростная инжекция позволяет стабилизировать присоединенную каверну, подавляя автоко-

лебания ее длины, вызываемые развитием неустойчивостей. Увеличение скорости инжектирования, однако, не меняет режим течения, но несколько интенсифицирует парообразование. На режимах с более развитой кавитацией инжекция уже не способна оказать заметного влияния на динамику каверны, режим обтекания остается нестационарным. В таких случаях наблюдается обратный эффект: с увеличением скорости инжектирования происходит постепенный рост каверны. Однако при относительно больших углах атаки высокоскоростная инжекция позволяет сдвинуть точку отрыва пограничного слоя к задней кромке НЛ и тем самым улучшить гидродинамическое качество гидрокрыла. Следовательно, применение метода тангенциальной инжекции для управления нестационарными кавитационными кавернами оправданно только в узком диапазоне чисел кавитации и при малых углах атаки, когда можно подавить развитие нестационарностей.

Таким образом, низкоскоростная инжекция оказывается более эффективной для управления развитием кавитационных каверн, но инжектирование жидкости с высокой скоростью более выгодно с точки зрения гидродинамики течения, особенно на стационарных режимах. В общем и целом полученные результаты наглядно демонстрируют возможность метода непрерывной тангенциальной инжекции при определенных условиях управлять кавитирующими течениями. Реализация данного метода на промышленных объектах потенциально может расширить диапазон рабочих режимов гидротурбин за счет подавления кавитации и ухода от нежелательных нестационарных режимов. Однако очевидно, что для более глубокого понимания физики наблюдаемых явлений и оптимизации параметров работы данного метода требуются дальнейшие исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14–29–00203, руководитель – проф. К. Хангялич) в НГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Watanabe S., Tsujimoto Y., Furukawa A. Theoretical analysis of transitional and partial cavity instabilities // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2001. – Т. 123. – № 3. – P. 692–697.
2. An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities / D.T. Kawakami, A. Fuji, Y. Tsujimoto, R.E.A. Arndt // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2008. – V. 130. – № 3. – P. (031303)–8.
3. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet / M. Callenaere, J.-P. Franc, J.-M. Michel, M. Riondet // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – V. 444. – P. 223–256.
4. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique / A. Kubota, H. Kato, H. Yamaguchi, M. Maeda // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 1989. – V. 111. – № 2. – P. 204–210.
5. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. P. 1. Cavities forming on models without spanwise variation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – V. 431. – P. 1–41.
6. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation / B. Huang, Y.L. Young, G. Wang, W. Shyy // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2013. – V. 135. – № 7. – P. (071301)–16.
7. Chatterjee D., Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1997. – V. 332. – P. 377–394.
8. Chatterjee D., Arakeri V.H. Some investigations on the use of ultrasonics in travelling bubble cavitation control // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2004. – V. 504. – P. 365–389.
9. Tip vortex cavitation suppression by active mass injection / N. Chang, H. Ganesh, R. Yakushiji, S.L. Ceccio // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2011. – V. 133. – № 11. – P. (111301)–11.
10. Franc J.P., Michel J.M. Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1988. – V. 193. – P. 171–189.
11. Tassin Leger A., Ceccio S.L. Examination of the flow near the leading edge of attached cavitation. Part 1. Detachment of two-di-

- mensional and axisymmetric cavities // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1998. – V. 376. – P. 61–90.
12. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation / O. Coutier-Delgosha, J.-F. Devillers, M. Leriche, T. Pichon // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2005. – V. 127. – № 4. – P. 726–733.
 13. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects / S.A. Churkin, K.S. Pervunin, A.Yu. Kravtsova, D.M. Markovich, K. Hanjalić // *Journal of Visualization*. – 2016. – V. 19. – № 4. – P. 587–590.
 14. Mechanism and control of cloud cavitation / Y. Kawanami, H. Kato, H. Yamaguchi, M. Tanimura, Y. Tagaya // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 1997. – V. 119. – № 4. – P. 788–794.
 15. The effects of a tripped turbulent boundary layer on vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil / Ph. Ausoni, A. Zobeiri, F. Avellan, M. Farhat // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2012. – V. 134. – № 5. – P. (051207)–11.
 16. Cavity induced vibration of flexible hydrofoils / D.T. Akcabay, E.J. Chae, Y.L. Young, A. Ducoin, J.A. // *Astolfi Journal of Fluids and Structures*. – 2014. – V. 49. – P. 463–484.
 17. Hydrofoil performance control introducing tangential liquid jet / P.G. Kozhukharov, V.H. Hadjimikhalev, V.I. Mikuta, L.I. Maltzev // *ASME Fluids Engineering Division*. – 1985. – V. 31. – P. 67–74.
 18. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле NACA0015: визуализация и измерение скорости / А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский, К. Ханъялич // *Известия российской академии наук. Энергетика*. – 2014. – № 4. – С. 96–106.
 19. Особенности кавитационного обтекания уменьшенной модели направляющих лопаток радиально-осевой турбины / М.В. Тимошевский, С.А. Чуркин, А.Ю. Кравцова, К.С. Первунин, Г.А. Семёнов, Д.М. Маркович, К. Ханъялич // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 79–94.
 20. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) / Е.К. Ахметбеков, А.В. Бильский, Ю.А. Ложкин, Д.М. Маркович, М.П. Токарев, А.Н. Тюрюшкин // *Вычислительные методы и программирование*. – 2006. – Т. 7. – № 3. – С. 79–85.
 21. Мальцев Л.И. Управление кавитационным течением путем замыкания каверны на жидкую струю и отсосом жидкости за каверной // *Труды Акустического института*. – 1969. – В. 7. – С. 39–51.

Поступила 24.11.2016 г.

Информация об авторах

Тимошевский М.В., инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; старший лаборант Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета.

Запругаев И.И., инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; лаборант-исследователь Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета.

Первунин К.С., младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; младший научный сотрудник Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета.

Мальцев Л.И., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Маркович Д.М., доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, заместитель директора Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; профессор Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета; профессор Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ханъялич К., доктор наук, профессор Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета; профессор Факультета химического машиностроения Делфтского технического университета.

UDC 532.528+532.574.7+532.582.32

CAVITATION CONTROL ON A TWO-DIMENSIONAL HYDROFOIL BY MEANS OF CONTINUOUS TANGENTIAL INJECTION

Mikhail V. Timoshevskiy^{1,2},
timoshevskiy.mv@gmail.com

Ivan I. Zapryagaev^{1,2},
ivanzapryagaev@gmail.com

Konstantin S. Pervunin^{1,2},
pervunin@itp.nsc.ru

Leonid I. Maltsev¹,
maltzev@itp.nsc.ru

Dmitriy M. Markovich^{1,2,3},
dmark@itp.nsc.ru

Kemal Hanjalić^{2,4},
khanjalic@gmail.com

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
2, Pirogov Street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ Delft University of Technology,
136, Julianalaan, Delft, 2628 BL, the Netherlands.

The onset of instabilities of various types, including those caused by cavitation, in ducts of hydraulic systems negatively affects the efficiency, reliability and safety of hydrotechnical and hydropower equipment. This fact makes it necessary to develop different means to control such flows.

The main aim of the study is to determine the possibility of applying and assessing the effectiveness of the method of gas-vapor cavity dynamics management based on continuous tangential injection of liquid.

The methods used in the study. In order to study the stages of evolution and spatial structure of partial cavities as well as to estimate their integral characteristics, the high-speed visualization was applied. Spatial distributions of the mean velocity and turbulent characteristics in one- and two-phase flows around the model hydrofoil were measured by Particle Image Velocimetry (PIV).

The results. The investigation was carried out for a modified model of guide vanes of a high-pressure turbine equipped with a spanwise slot channel in its surface to produce a wall jet to feed slowed down layers of liquid with a supplementary momentum over the suction side. In the experiments, the angle of attack of the model profile was changed from zero to nine degrees and various flow conditions were achieved by varying the cavitation number in a wide range. Basing on visual analysis of occurring flow regimes, starting from cavitation inception and finishing with developed unsteady cavities, the influence of injection on cavitation was determined. The effect of liquid injection with different velocities on the flow hydrodynamics was evaluated by measuring ensembles of instantaneous velocity which were used to calculate distributions of mean and turbulent characteristics. It was shown that the low-speed injection of liquid along the hydrofoil surface leads to intensification of turbulent fluctuations in the boundary layer and, thereby, hinders the development of an attached cavity due to production of additional perturbations in the flow. Injection with a high velocity, in its turn, causes a rise of the local flow velocity and reduction of turbulent fluctuations near the wall, which allows increasing the lift coefficient of the foil and its hydrodynamic quality owing to a pressure drop over the suction side at relatively low energy consumptions to generate the wall jet. However, in such a case the gas-vapor cavity becomes longer. Thus, the low-speed injection turns out to be effective to mitigate cavitation but the injection at a high velocity is more preferable from the standpoint of the flow hydrodynamics. Consequently, the implemented method of flow control is quite an efficient tool to manipulate hydrodynamic characteristics of the foil and decrease the intensity of vaporization and, under certain conditions, even to suppress instabilities linked with cavitation.

Key words:

Cavitation, partial cavities, instability, flow control, continuous tangential injection, guide vane, high-speed imaging, PIV.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 14–29–00203, the chief is professor Kemal Hanjalić) at SNU.

REFERENCES

1. Watanabe S., Tsujimoto Y., Furukawa A. Theoretical analysis of transitional and partial cavity instabilities. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2001, vol. 123, no. 3, pp. 692–697.
2. Kawakami D.T., Fuji A., Tsujimoto Y., Arndt R.E.A. An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2008, vol. 130, no. 3, pp. (031303)–8.
3. Callenaere M., Franc J.-P., Michel J.-M., Riondet M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 444, pp. 223–256.
4. Kubota A., Kato H., Yamaguchi H., Maeda M. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1989, vol. 111, no. 2, pp. 204–210.
5. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. P. 1. Cavities forming on models without spanwise variation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 431, pp. 1–41.
6. Huang B., Young Y.L., Wang G., Shyy W. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2013, vol. 135, no. 7, pp. (071301)–16.
7. Chatterjee D., Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, vol. 332, pp. 377–394.
8. Chatterjee D., Arakeri V.H. Some investigations on the use of ultrasonics in travelling bubble cavitation control. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, vol. 504, pp. 365–389.
9. Chang N., Ganesh H., Yakushiji R., Ceccio S.L. Tip vortex cavitation suppression by active mass injection. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2011, vol. 133, no. 11, pp. (111301)–11.
10. Franc J.P., Michel J.M. Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, vol. 193, pp. 171–189.
11. Tassin Leger A., Ceccio S.L. Examination of the flow near the leading edge of attached cavitation. Part 1. Detachment of two-dimensional and axisymmetric cavities. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 376, pp. 61–90.
12. Coutier-Delgosha O., Devillers J.-F., Leriche M., Pichon T. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2005, vol. 127, no. 4, pp. 726–733.
13. Churkin S.A., Pervunin K.S., Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Hanjalić K. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects. *Journal of Visualization*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 587–590.
14. Kawanami Y., Kato H., Yamaguchi H., Tanimura M., Tagaya Y. Mechanism and control of cloud cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1997, vol. 119, no. 4, pp. 788–794.
15. Ausoni Ph., Zobeiri A., Avellan F., Farhat M. The effects of a tripped turbulent boundary layer on vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2012, vol. 134, no. 5, pp. (051207)–11.
16. Akcabay D.T., Chae E.J., Young Y.L., Ducoin A., Astolfi J.A. Cavity induced vibration of flexible hydrofoils. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, vol. 49, pp. 463–484.
17. Kozhukharov P.G., Hadjimikhalev V.H., Mikuta V.I., Maltzev L.I. Hydrofoil performance control introducing tangential liquid jet. *ASME Fluids Engineering Division*, 1985, vol. 31, pp. 67–74.
18. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskii M.V., Hanjalić K. Cavitation on a semicircular leading-edge plate and NACA0015 hydrofoil: visualization and velocity measurement. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 14, pp. 1003–1010.
19. Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Yu., Pervunin K.S., Semenov G.A., Markovich D.M., Hanjalić K. Features of the cavitating flow around a scaled-down model of guide vanes of a radial-axis turbine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 79–94. In Rus.
20. Akhmetbekov E.K., Bilsky A.V., Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Tyuryushkin A.N. Software for experiment management and processing of data obtained by digital flow visualization techniques (ActualFlow). *Numerical Methods and Programming*, 2006, vol. 7, no. 3, pp. 79–85. In Rus.
21. Maltzev L.I. Upravlenie kavitatsionnym techeniem putem zamykaniya kaverny na zhidkuyu struyu i otosom zhidkosti za kavernoy [Cavity flow control by closing the cavity on a liquid jet and by liquid suction behind the cavity]. *Proceedings of Acoustical Institute*, 1969, vol. 7, pp. 39–51.

Received: 24 November 2016.

Information about the authors

Mikhail V. Timoshevskiy, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; senior laboratory assistant, Novosibirsk State University.

Ivan I. Zapryagaev, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; research laboratory assistant, Novosibirsk State University.

Konstantin S. Pervunin, junior research fellow, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; junior research fellow, Novosibirsk State University.

Leonid I. Maltsev, Dr. Sc., principal scientific officer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Dmitriy M. Markovich, Dr. Sc., corresponding member of the Russian Academy of Sciences, deputy director, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; professor, Novosibirsk State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kemal Hanjalić, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State University; professor, Delft University of Technology.

УДК 621.3:001.893

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Стругов Вячеслав Владимирович¹,
sv_altai@sibmail.com

Лавринович Валерий Александрович¹,
lavrhome@mail.ru

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

Актуальность: В большинстве производственных процессов нефтедобывающей, горнорудной, угольной и других отраслях промышленности используются электрические машины постоянного тока. Надежность их работы в значительной степени зависит от состояния изоляции, роль которой играет эмалевая изоляция обмоточных проводов и главная изоляция стержней крупных электрических машин. Дефекты изоляции приводят к неожиданным отказам в работе электрических машин и, как следствие, к аварийным ситуациям, к простоям и к высоким экономическим потерям из-за недоотпуска продукции и затрат на ликвидацию отказа машины. Причины выхода из строя электродвигателей постоянного тока достаточно много, большинство из них связано с повреждением изоляции из-за воздействия на нее частичных разрядов. Для своевременного предупреждения выхода из строя машин постоянного тока и снижения затрат на unplanned остановки, по замене вышедшего из строя электродвигателя, необходимо выявлять частичные разряды на ранней стадии, чтобы выводить оборудование в ремонт в плановом порядке. Исследованию появления и влияния частичных разрядов на изоляцию уделяется много внимания начиная с начала XX в. Основная часть исследований относится к оборудованию, работающему на переменном напряжении. Для оборудования, работающего на постоянном напряжении, надежных методов обнаружения частичных разрядов пока не разработано. Поэтому в настоящее время тема выявления частичных разрядов в машинах постоянного тока является достаточно актуальной. Перспективным способом обнаружения частичных разрядов является применение импульсного метода. Метод основан на диагностике переходного процесса в системе обмотка–изоляция электрической машины при подаче высоковольтного диагностического импульса на вход обмотки машины. По отклику от диагностического импульса можно судить о наличии частичных разрядов в изоляции и уровне напряжения, при котором они возникают. Для детального понимания переходных процессов в системе обмотка–изоляция с учетом частичных разрядов требуется создание схемотехнической электрической модели, так как не все состояния обмотки можно воспроизвести в реальной изоляции машины.

Цель работы: создание электротехнической модели для демонстрации и исследования метода обнаружения частичных разрядов при помощи подаваемого импульсного напряжения на испытуемый объект.

Методы исследования: схемотехническое моделирование процессов проявления частичных разрядов, наблюдаемых в эксперименте, при помощи разработанной модели в среде Micro-Cap.

Результаты. Создана электротехническая модель экспериментальной установки, в которой искусственно и контролируемо создаются условия для возникновения частичных разрядов. Модель отображает проявление частичных разрядов идентично наблюдаемым в эксперименте. Это позволило выявить связь между формой наблюдаемых в эксперименте осциллограмм и наличием или отсутствием частичных разрядов в изоляции испытуемых объектов.

Ключевые слова:

Электродвигатель постоянного тока, частичный разряд, импульсный метод, обнаружение, дефект, науглероживание, ресурсоэффективность.

Введение

Для энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе георесурсов важную роль играет состояние электротехнического оборудования. Высокие требования к эксплуатационной надежности, простоте и безопасности обслуживания оборудования нефтегазовых промыслов предъявляют широкий ряд условий, которым должны удовлетворять электроприводы [1, 2]. Выход из строя одного электродвигателя может привести как к экономическим затратам, так и к повышенным неоправданным затратам ресурсов. Практически в любом высоковольтном оборудовании в рабочих режимах существуют частичные разряды, однако их разрушающая способность может быть различна. Наличие дефектов в изоляции на основе полимерных материалов первопричина возникновения частичных разрядов. Существенными факторами, определяющими деструкцию диэлектрика

под действием частичных разрядов, являются бомбардировка их поверхности заряженными частицами из плазмы газового разряда, химическое взаимодействие с продуктами, образующимися в разряде, а также ультрафиолетовое облучение. Роль отдельных факторов действия разряда для разных полимеров может быть различной [3].

В современных условиях, когда более 50 % силового электрооборудования объектов Российской энергетики и большинства промышленных предприятий достигло нормативного срока эксплуатации, а его обновление происходит низкими темпами, основной задачей становится продление срока службы оборудования вплоть до выработки реального, заложенного при изготовлении, ресурса [4]. Обеспечение продолжительного срока службы электрической изоляции, и, как следствие, рационального использования георесурсов, является важной научной и практической задачей.

Рядом авторов [5, 6] показано, что разрушение изоляции происходит под действием ионизации в газовых включениях. Обследование электрооборудования физическими способами достаточно распространено и широко применяется. Однако эти методы позволяют лишь увидеть результат, есть или нет частичные разряды [4, 7–24]. Использование компьютерной модели позволяет, по известным параметрам, промоделировать и получить приближенную картину процессов в электрооборудовании. По модели приближенно можно оценить величину дефектов, в которых протекают частичные разряды, и составить прогноз по остаточному ресурсу.

Моделирование

Предварительными экспериментами на физической модели [25] было показано, что частичные разряды можно обнаруживать по осциллограмме тока в контуре, в котором включен испытуемый объект. Блочная схема этого эксперимента приведена на рис. 1. По результатам исследования процессов в такой схеме был получен патент на устройство обнаружения частичных разрядов [26].

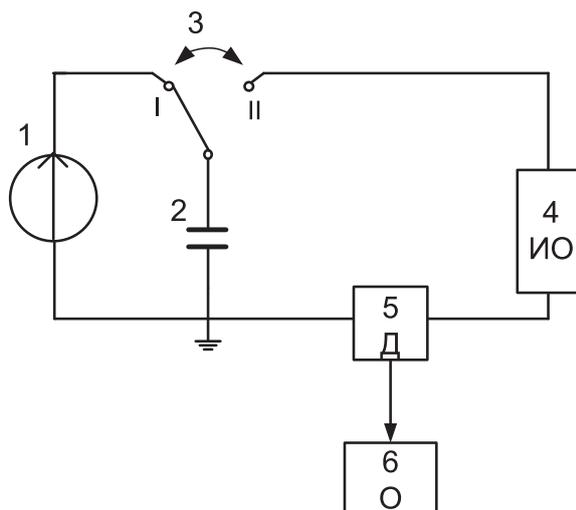


Рис. 1. Блочная схема модели: 1) высоковольтный источник постоянного тока; 2) высоковольтный конденсатор; 3) коммутационный ключ; 4) испытуемый объект; 5) датчик; 6) осциллограф Tektronix типа TDC-2012 с полосой 100 МГц

Fig. 1. Block diagram of the model: 1) high-voltage of DC power source; 2) high-voltage capacitor; 3) switching key; 4) test object; 5) sensor; 6) Tektronix TDC-2012-type oscilloscope with 100 MHz bandwidth

Принцип работы физической модели для обнаружения частичных разрядов по патенту [26] заключается в следующем: высоковольтным источником постоянного тока, через первое положение коммутационного ключа, заряжаем высоковольтный конденсатор. Далее переключаем коммутационный ключ во второе положение, тем самым подавая на испытуемый объект импульсное напряжение постоянного тока [26]. Это импульсное напряжение возбуждает емкости испытуемого объекта, и

на осциллограмме видны высокочастотные колебания тока рис. 2. При повышении напряжения на емкости – 2 в объекте могут появиться частичные разряды, которые приводят к изменению формы тока, фиксируемого с помощью шунта – 5.

В ходе экспериментов на физической модели был испытан ряд материалов с присутствующими дефектами и без них. При работе с искусственным дефектом в органическом стекле с увеличением напряжения появляются частичные разряды. На рис. 2, 3 приведены осциллограммы при различном импульсном напряжении. Сравнительный анализ показал, что увеличение уровня заряда напряжения конденсатора приводит к пропаданию выбросов на осциллограмме тока, и значение максимального выброса уменьшается с десятков вольт до единиц. Это объясняется тем, что емкость объекта мала, соответственно мала энергия, запасаемая в емкости объекта. Появление частичного разряда ведет к расходу энергии на его протекание, поэтому значимая часть энергии, запасаемая в емкости объекта, расходуется и тем самым высокочастотные всплески тока быстро затухают, что наблюдается на осциллограмме тока.

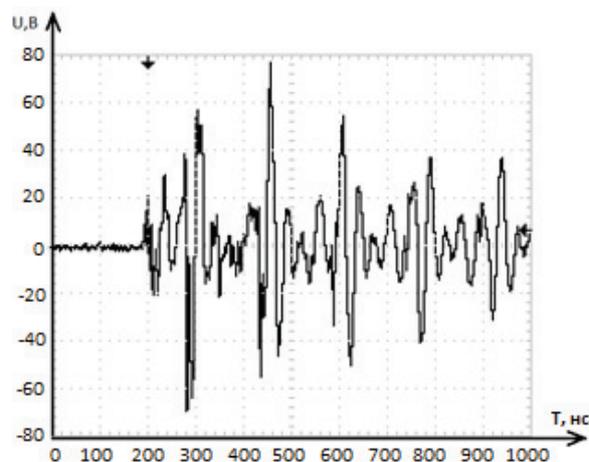


Рис. 2. Переходная характеристика при 6 кВ

Fig. 2. Transient response at 6 kV

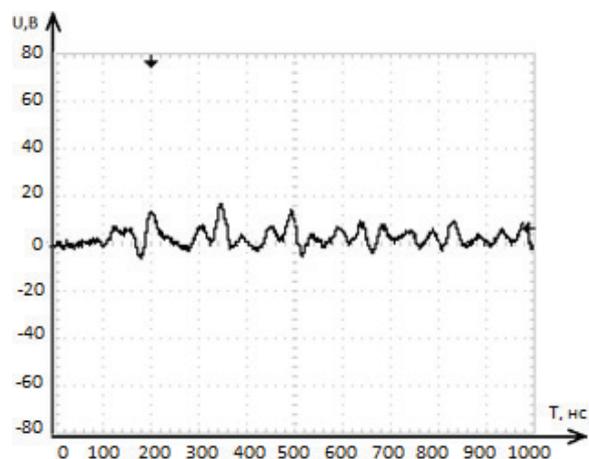


Рис. 3. Переходная характеристика при 9 кВ

Fig. 3. Transient response at 9 kV

После ряда повторений эксперимента на напряжении 9 кВ и дальнейшем увеличении напряжения характеристика, снимаемая с осциллографа, приняла вид, приведенный на рис. 4. При повторном проведении эксперимента на напряжении 9 кВ на этом же объекте вид осциллограммы, приведенной на рис. 3, не повторяется. Это объясняется тем, что после зажигания частичных разрядов в искусственном дефекте появилось науглероживание на поверхности дефекта, из-за этого частичный разряд не образуется и энергия не расходуется на дефекте. Условно вначале дефект представляется емкостью, а затем, когда науглероживается, – является активным сопротивлением, которое шунтирует емкость дефекта [25].

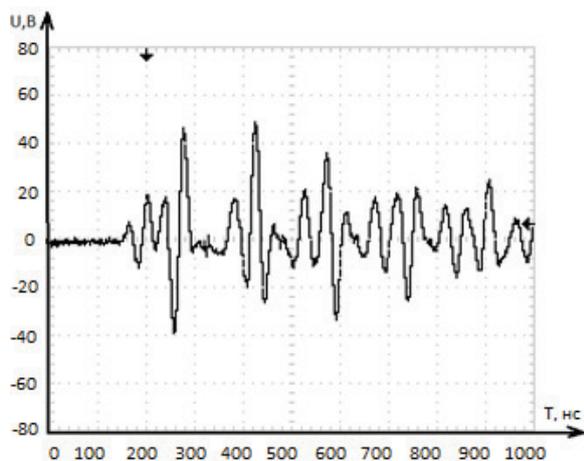


Рис. 4. Переходная характеристика при 11 кВ

Fig. 4. Transient response at 11 kV

Из этого результата следует важный вывод, что диагностику изоляции высоковольтного оборудования необходимо начинать проводить на новых изделиях и делать ее периодически на протяжении всего срока службы для своевременной и правильной оценки состояния изоляции. Если диагностику делать нерегулярно, то можно пропустить нача-

ло возникновения частичных разрядов, которые могут науглеродить возникшие в изоляции полости и зашунтировать их. Зашунтированные дефекты не будут проявляться как частичные разряды, но разрушение изоляции будет происходить за счет прорастания дефекта (дендрита) в тело изоляции, что в конечном итоге приведет к пробое изоляции, а значит неожиданному выходу из строя оборудования.

Предлагаемая методика была применена при экспериментах с конденсаторной бумагой типа КОН-2 толщиной 10 мкм. Перед проведением опытов на непропитанном конденсаторе бумага была просмотрена под электронным микроскопом. Все инородные тела были зафиксированы, после проведения испытаний по методу импульсной диагностики бумага была повторно исследована, и были выявлены новые пятна рис. 5. Появление науглероживания в местах предполагаемых дефектов, которые не были зафиксированы визуально, подтверждает появления частичного разряда в данном месте. Наблюдаемое науглероживание от протекающих частичных разрядов в данном случае имеет небольшие размеры, так как воздушные включения, обусловленные размером дефектов в бумаге, также малы. В то же время по осциллограммам возникающие частичные разряды обнаруживаются.

По параметрам одного из испытуемых объектов была создана компьютерная модель в программе Micro Cap [27], которая приведена на рис. 6. В основе модели частичного разряда лежит классическая схема замещения частичного разряда (на рис. 6 блоки Б, В и Г), описанная в работах многих авторов [28, 29]. Отличие предложенной модели частичного разряда от известных заключается в ведении управляемых напряжением ключей Vo1 и Vo2, срабатывание которых зависит от амплитуды прикладываемого напряжения, и введением в ветвь разряда частичного разряда сопротивления, которое имитирует науглероживание в месте образования частичного разряда.

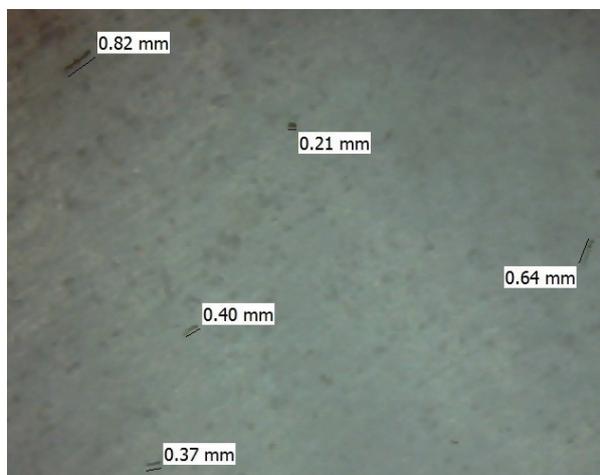
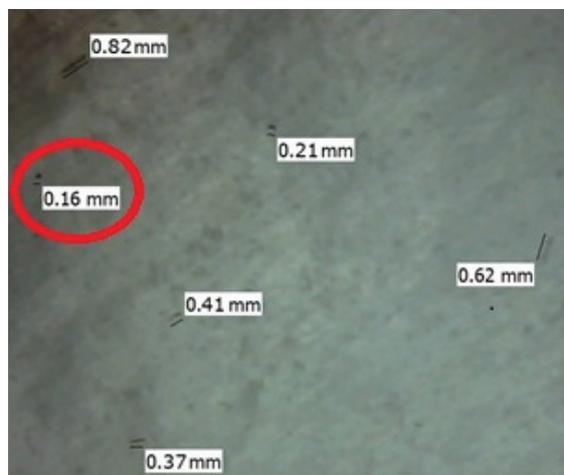


Рис. 5. Фрагмент бумаги до и после испытания

Fig. 5. Fragment of the paper before and after the test



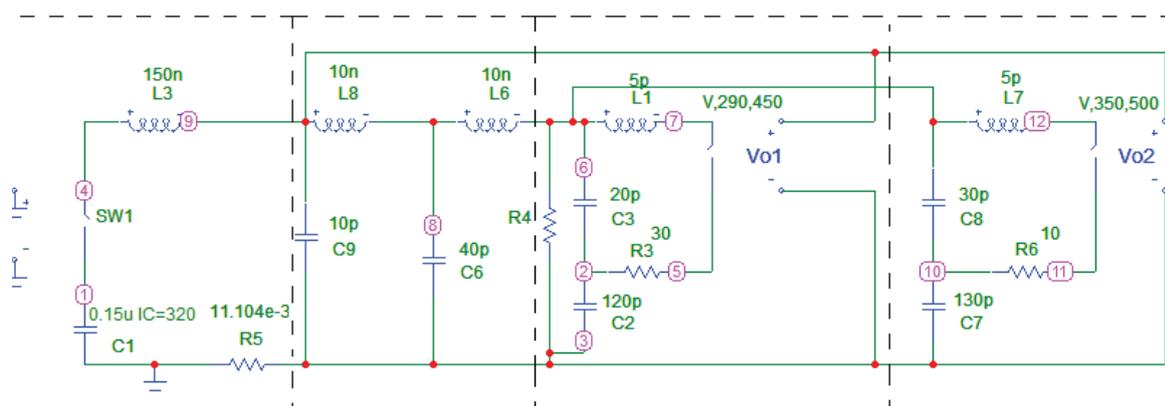


Рис. 6. Схема модели в программе Micro Cap: А) высоковольтный конденсатор, коммутационный ключ, индуктивность проводников и шунт; Б) часть объекта без дефекта; В, Г) часть с дефектом

Fig. 6. Scheme of the model in Micro Cap program: А) high-voltage capacitor, switch, inductor conductors and shunt; Б) part of the object without defect; В, Г) the part with the defect

В программе смоделирована правая часть физической модели в момент переключения коммутационного ключа. В части А, включающей в себя высоковольтный конденсатор, коммутационный ключ, индуктивность проводников, которыми подключена схема, и шунт R5, моделируется момент включения коммутационного ключа и подача напряжения от конденсатора, заряженного до определенной величины, к испытываемому объекту.

Испытуемый объект в свою очередь делится на части, включающие в себя дефекты В и Г, в которых происходят частичные разряды, и части без дефектов Б. Различие В и Г частей схемы в размерах дефектов и как следствие параметров и напряжений пробоя частичного разряда. Часть В моделирует дефекты малого размера, ключ Vo1 имеет напряжение включения 290 В. Часть Г моделирует дефекты большего размера, по сравнению с частью В, и как следствие при больших размерах требуется большее напряжение для возникновения частичного разряда, поэтому Vo2 напряжение включения составляет 350 В.

Величина емкости испытываемого объекта в физической модели составляла 90 пФ, сумма емкостей всех частей в компьютерной модели также 90 пФ. Соотношение емкостей с дефектом и без в модели также было приблизительно рассчитано по формуле (1).

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (1)$$

где S – площадь дефекта м^2 ; d – расстояние между пластинами м; ε_0 – электрическая постоянная Ф/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала.

Размер пятен на изоляции после испытаний составлял от единиц миллиметра до десятков миллиметра. Расчетные значения по формуле (1) получились 38 пФ. После корректировок значений емкостей для получения сходства переходных характеристик с физической моделью были получены зна-

чения для дефекта 50 пФ. Расхождения в значениях могут быть обусловлены пропуском части мелких дефектов в одной части изоляции, в бумаге, или присутствием воздушных включений рядом с полиимидной пленкой, обусловленных неплотным прилеганием.

На рис. 7–9 приведены осциллограммы с физической модели при различном импульсном напряжении. При сравнительном анализе полученных данных видно, что при увеличении уровня напряжения заряжаемого конденсатора пропадают высокочастотные всплески рис. 9. Как уже указывалось, это связано с тем, что на частичный разряд расходится часть энергии, и тем самым снижается амплитуда колебаний напряжения и увеличивается потери высокочастотной составляющей колебаний, остается собственное колебание контура, обусловленное его емкостью и индуктивностью.

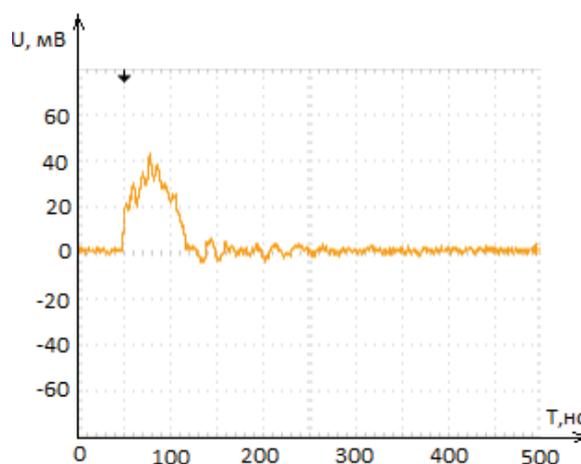


Рис. 7. Переходная характеристика при 200 В

Fig. 7. Transient response at 200 V

Моделированием в программе Micro-Cap (рис. 6) были получены переходные характеристики, приведенные на рис. 10–12.

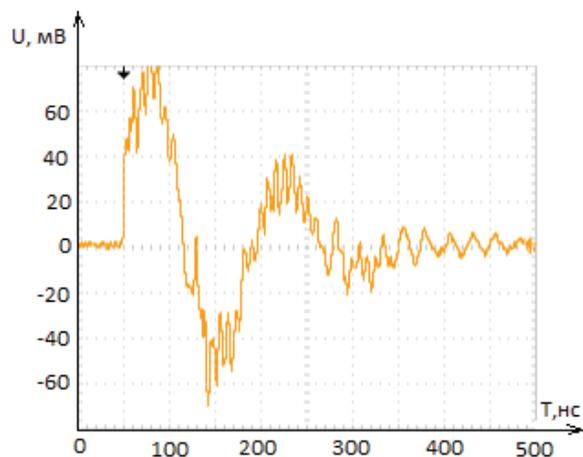


Рис. 8. Переходная характеристика при 260 В

Fig. 8. Transient response at 260 V

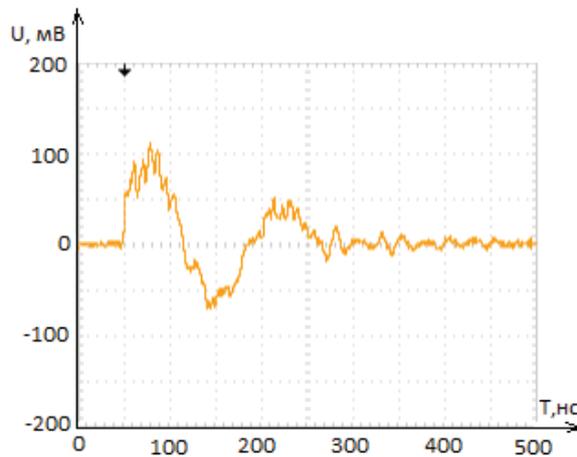


Рис. 9. Переходная характеристика при 320 В

Fig. 9. Transient response at 320 V

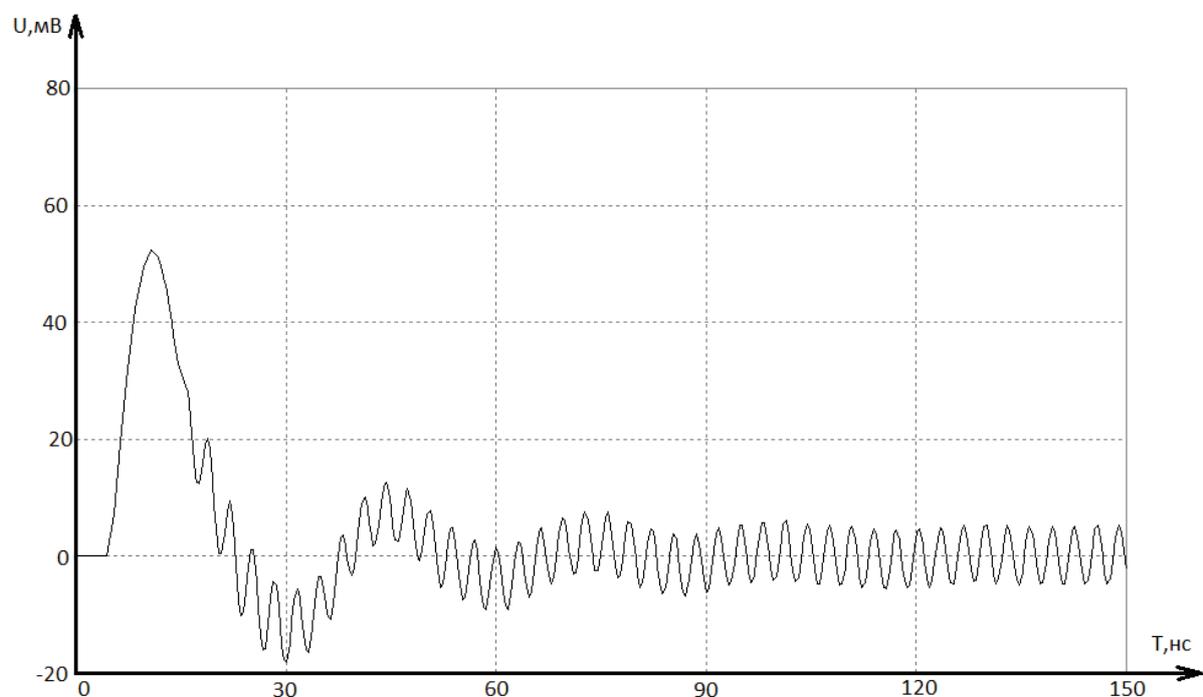


Рис. 10. Переходная характеристика при 200 В

Fig. 10. Transient response at 200 V

На осциллограммах, полученных при моделировании (рис. 10–12), так же как и на осциллограммах, полученных из эксперимента (рис. 7–9), можно наблюдать, что с нарастанием напряжения на диагностируемой изоляции увеличивается амплитуда переходной характеристики и вместе с ней высокочастотная составляющая. С появлением частичных разрядов происходит уменьшение высокочастотной составляющей.

Сравнение осциллограмм, полученных на физической модели и смоделированных в Micro-Cap, показывает их удовлетворительное сходство. Ос-

новными критериями сходства являются, во-первых, появление либо исчезновение высокочастотной составляющей. Во-вторых, затухание высокочастотных колебаний, которое объясняется рассеиванием энергии в искре частичного разряда. Это доказывает правильность выдвинутого объяснения явлений, происходящих в частичном разряде при воздействии импульсного напряжения [17], и адекватность разработанной модели процессам, протекающим в экспериментальной схеме при наличии или отсутствии в изоляции частичных разрядов.

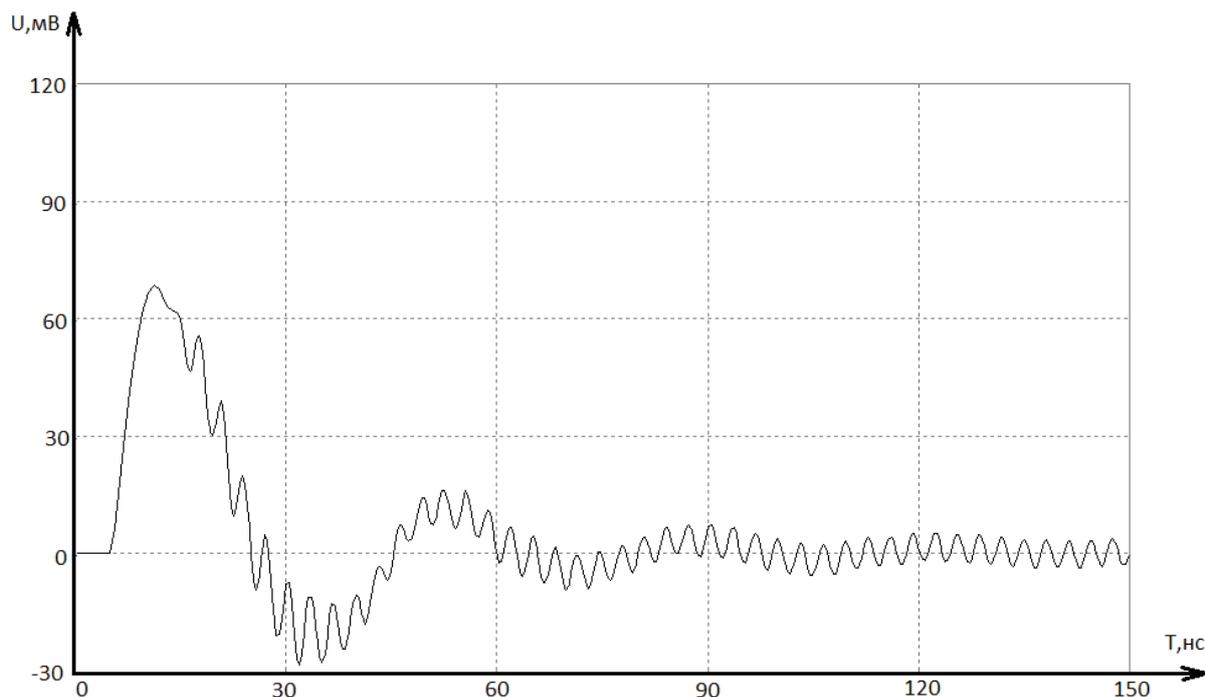


Рис. 11. Переходная характеристика при 260 В

Fig. 11. Transient response at 260 V

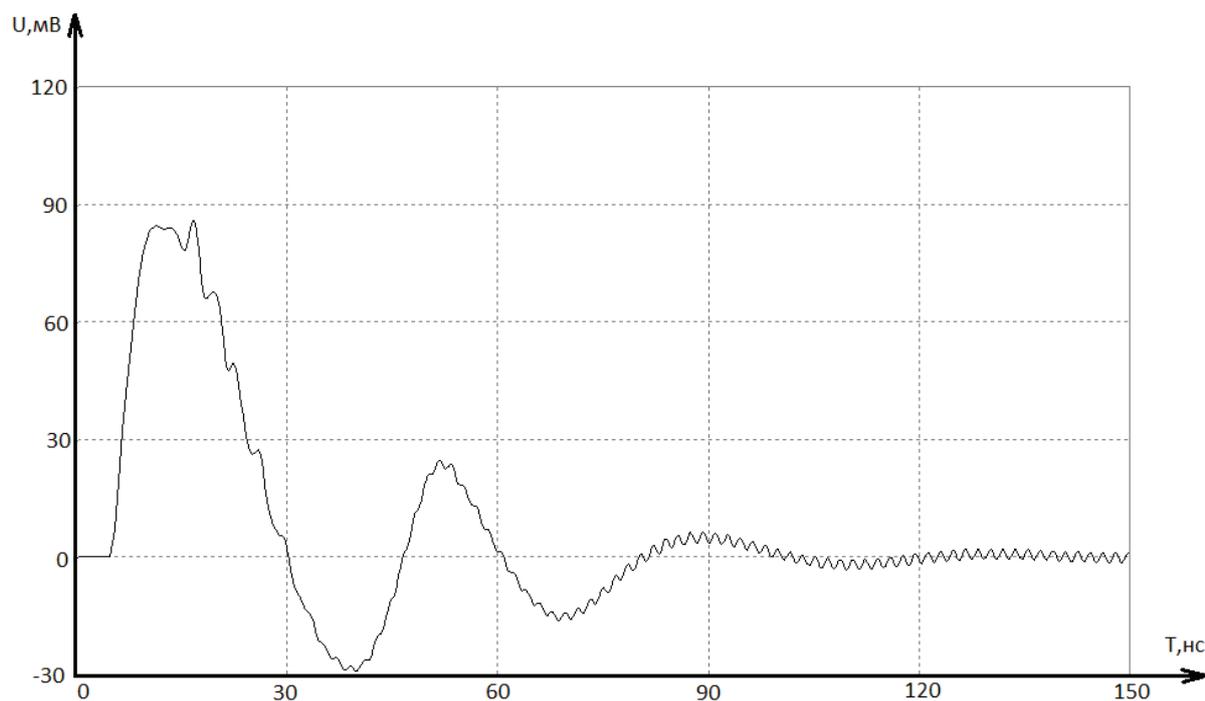


Рис. 12. Переходная характеристика при 320 В

Fig. 12. Transient response at 320 V

Полученные результаты моделирования позволяют по виду переходной характеристики, снятой на реальном объекте, и характеристики, полученной на модели с подбором параметров дефекта, оценивать степень поражения твердой изоляции частичными разрядами. Набор практических ста-

тистических данных по выходу из строя изоляции машин постоянного тока и сопоставление степени поражения изоляции частичными разрядами позволит прогнозировать остаточный ресурс оборудования и своевременный вывод его из эксплуатации для профилактики или ремонта. Таким обра-

зом, можно повысить надежность эксплуатации и предупредить случайные аварии, связанные с пробоем изоляции из-за частичных разрядов.

Заключение

Предложенная электрическая модель удовлетворительно отражает полученные ранее экспериментальные результаты на физической модели по регистрации частичных разрядов и подтверждает работоспособность метода по обнаружению частичных разрядов с помощью приложения к изоляции импульсного напряжения с регистрацией тока переходного процесса.

Найденная связь между формой наблюдаемых осциллограмм тока и наличием или отсутствием частичных разрядов в диагностируемом объекте позволяет сделать вывод о влиянии науглерожива-

ния дефектов при частичном разряде на форму осциллограмм и сделать заключение, что науглероживание может затруднить обнаружение частичных разрядов. В связи с этим требуется регулярный контроль состояния изоляции для своевременного обнаружения частичных разрядов и предотвращения неожиданного выхода из строя высоковольтной изоляции.

Модель протекания процессов в твердом диэлектрике при диагностике изоляции на наличие частичных разрядов импульсным методом в совокупности с экспериментальными результатами позволяет оценивать степень поражения твердой изоляции частичными разрядами. В перспективе данный подход позволит прогнозировать остаточный ресурс работы изоляции при соответствующем уровне рабочего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение предприятий добычи и переработки нефти и газа. – М.: Форум, 2014. – 352 с.
2. Сибикин Ю.Д. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. Оборудование систем электроснабжения. – М.: ИП РадиоСофт, 2015. – 352 с.
3. Галичин Н.А., Борисова М.Э. Влияние частичных разрядов на спектры токов термостимулированной деполаризации // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Физика. – 2009. – № 79. – С. 119–128.
4. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с.
5. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges // Journal of Institution of Electrical Engineers. – 1951. – V. 1951. – P. 76.
6. Беркс Дж.Б., Шульман Дж.Г. Прогресс в области диэлектриков // Госэнергиздат. – 1962. – Т. 1. – С. 118–166.
7. Tsyokhla I., Griffo A., Wang J. On-line monitoring of winding insulation health using high frequency common mode voltage from PWM // IEEE International Electric Machines & Drives Conference. – USA, 2015. – P. 1433–1439.
8. Wahidabanu R.S.D., Panneerselvam M.A., Udayakumar K. Diagnosis and monitoring of high-voltage insulation using computerized analysis of partial discharge measurements // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 1998. – V. 23. – P. 171–177.
9. Partial discharges in void defect of gas insulated switchgear insulator under standard aperiodic and oscillating switching impulses / Ming Ren, Ming Dong, Chongxing Zhang, Jialin Liu // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – V. 23. – P. 2933–2941.
10. Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. Регистрация частичных разрядов в изоляции маслонаполненного оборудования // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды Ивановского государственного энергетического университета. – 2001. – Вып. 4. – С. 303–309.
11. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
12. On-line partial discharge (OLPD) insulation condition monitoring of complete high voltage (HV) networks in the oil & gas industry / L. Renforth, A. Burgess, M. Foxall, Th. Raczky // IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference. – Brasil, 2014. – P. 14–23.
13. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high-voltage motors located in «Ex» (hazardous) locations / L. Renforth, R. Armstrong, D. Clark, S. Goddellow, P.S. Hamer // Petroleum and Chemical Industry Conference. – USA, 2012. – P. 1–10.
14. Study on the methodology of monitoring insulation defects of high-voltage bushing / Yu-sheng Quan, Zi-sen Ning, Shu-yong Chen, Tie-ying Xu, Yu Zhou // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – USA, 2012. – P. 156–159.
15. Аксенов Ю.П., Завидей В.И., Ярошенко И.В. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локализации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов // Электро. – 2004. – № 5. – С. 19–24.
16. Акустическая локация электрических разрядов в измерительных трансформаторах / А.П. Долин, С.К. Цветаев, Ч. Поночко, А. Поночко // Электро. – 2005. – № 2. – С. 27–31.
17. Ботьяев Ю.В., Михеев А.Г., Храпцов А.Н. Диагностика высоковольтного оборудования подстанции // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды Ивановского государственного энергетического университета. – 2001. – Вып. 4. – С. 291–294.
18. Виноградова Л.В. Экспертная поддержка процессов проектирования и диагностики силовых трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1996. – 18 с.
19. Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring // IEEE Industry Applications Magazine. – 1998. – V. 4. – P. 15–20.
20. Овсянников А.Г. Стратегии ТОиР и диагностика оборудования // Новости электротехники. – 2008. – № 2. – С. 140–142.
21. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low voltage impulse / V.A. Lavrinyovych, Dobizha N.E., Pichugina M.T., G.A. Nizkodubov // 9th International Forum on Strategic Technology. – Bangladesh, 2014. – P. 382–385.
22. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of Advanced Control State Technology of Transformer and Electric Motor Windings Based on Pulsed Method // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». – 2012. – V. 4. – P. 149–153.
23. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». – 2014. – V. 6. – P. 145–147.
24. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – V. 22. – P. 2041–2045.
25. Стругов В.В., Лавринович В.А. Обнаружение частичных разрядов в машинах постоянного тока импульсным методом //

- Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 72–77.
26. Устройство для обнаружения частичных разрядов: пат. Рос. Федерация. № 2014106561/07; заявл. 20.02.2014; опубл. 17.03.2015, Бюл. № 16. – 5 с.
27. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 458 с.
28. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.
29. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 41 с.

Поступила 02.12.2016 г.

Информация об авторах

Стругов В.В., аспирант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лавринович В.А., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.3:001.893

CIRCUIT SIMULATION OF PARTIAL DISCHARGE ASPECTS

Vyacheslav V. Strugov¹,
sv_altai@sibmail.com

Valery A. Lavrinovich¹,
lavrhome@mail.ru

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

The DC motors are used in most production processes of oil, mining, coal and other industries. Reliability of their operation largely depends on the state of insulation such as enamel wire insulation and the main insulation of large electrical machines. Insulation defects lead to unexpected failure of electrical machines and, as a consequence, to emergencies, downtime and high economic losses due to undersupply of products and costs of machine failure liquidation. There are a lot of reasons for DC motors failure; most of them are associated with insulation damage due to exposure by partial discharges. It is necessary to identify partial discharges at the early stage to be repaired in time; it will reduce unplanned stops and expenses to replace a failed motor. Since the beginning of the twentieth century a lot of attention is paid to investigation of occurrence and impact of partial discharges on insulation. The bulk of the research refers to the equipment operating on alternating voltage. For the equipment operating at constant voltage the reliable methods for detecting partial discharges have not been developed yet. So, the theme of identifying partial discharges in DC machines is quite urgent. A promising method for detecting partial discharges is the use of the pulsed method. The method is based on the diagnosis of the transition process in the winding–insulation system of the electrical machine when applying a high-voltage pulse to the input of a diagnostic winding-machine. According to the response from the diagnostic pulse it is possible to judge on the partial discharges presence in insulation and the voltage level at which they occur. For the detailed understanding of the transition process a circuit electric model is required to be developed in the winding insulation system based on partial discharges, since not all the winding states can be reproduced in real insulation machines.

The aim of the research is to develop the electrical model to demonstrate and to study the method of detecting partial discharges with the aid of the supplied pulse voltage on the test object.

Methods: circuit simulation of partial discharges manifestation observed in the experiment using the developed model in Micro-Cap.

Results. The authors have developed the electrical model of the experimental setup in which the conditions for the occurrence of partial discharges are artificially created and controlled. The model allows showing the appearance of partial discharges identical to the ones observed in the experiment. This helped to identify the relationship between the form of the oscillograms observed in the experiment with the presence or absence of partial discharges in the test object.

Key words:

DC motors, partial discharge, pulse method, detection, defect, carburizing, resource efficiency.

REFERENCES

- Sibikin Yu.D. *Elektrosnabzhenie predpriyatiy dobychi i pererabotki nefiti i gaza* [Power supply of oil and gas mining and processing enterprises]. Moscow, Forum Publ., 2014. 352 p.
- Sibikin Yu.D. *Elektrooborudovanie neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Oborudovanie sistem elektrosnabzheniya* [Electrical equipment of oil and gas industry. Power system equipment]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2015. 352 p.
- Galichin N.A., Borisova M.E. Vliyanie chastichnykh razryadov na spektry tokov termostimulirovannoy depolyarizatsii [Effect of partial discharge on spectra of thermally stimulated depolarization currents]. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Science, Physics*, 2009, no. 79, pp. 119–128.
- Aksenov Yu.P. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovoltnoy izolatsii elektrooborudovaniya elektricheskogo naznacheniya v ekspluatatsii i pri remontakh* [Monitoring of technical state of high voltage insulation of electrical energy destination in operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2002. 338 p.
- Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges. *Journal of Institution of Electrical Engineers*, 1951, vol. 1951, p. 76.
- Berx J.B., Shulman J.G. Progress v oblasti dielektrikov [Progress in dielectrics]. *Gosenergoizdat*, 1962, vol. 1, pp. 118–166.
- Tsyokhla I., Griffo A., Wang J. On-line monitoring of winding insulation health using high frequency common mode voltage from PWM. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. USA, 2015, pp. 1433–1439.
- Wahidabanu R.S.D., Panneerselvam M.A., Udayakumar K. Diagnosis and monitoring of high-voltage insulation using computerized analysis of partial discharge measurements. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1998, vol. 23, pp. 171–177.
- Ming Ren, Ming Dong, Chongxing Zhang, Jialin Liu. Partial discharges in void defect of gas insulated switchgear insulator under standard aperiodic and oscillating switching impulses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, vol. 23, pp. 2933–2941.
- Golenko O.V., Zhivodernikov S.V., Ovsyannikov A.G. Registratsiya chastichnykh razryadov v izolyatsii maslonapolnenogo oborudovaniya [Register of partial discharges in insulation of oil-filled equipment]. *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem. Trudy Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2001, vol. 4, pp. 303–309.
- Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* [Methods and tools for diagnosis of high voltage equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, 240 p.
- Renforth L., Burgess A., Foxall M., Raczy Th. On-line partial discharge (OLPD) insulation condition monitoring of complete high voltage (HV) networks in the oil & gas industry. *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*. Brazil, 2014, pp. 14–23.
- Renforth L., Armstrong R., Clark D., Goodfellow S., Hamer P.S. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high-voltage motors located in «Ex» (hazardous) locations. *Petroleum and Chemical Industry Conference*, 2012, pp. 1–10.

14. Yu-sheng Quan, Zi-sen Ning, Shu-yong Chen, Tie-ying Xu, Yu Zhou. Study on the methodology of monitoring insulation defects of high-voltage bushing. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. USA, 2012, pp. 156–159.
15. Aksenov Yu.P., Zavidyev V.I., Yaroshenko I.V. Ispolzovanie usovershenstvovannykh metodov elektromagnitnoy lokatsii razryadnykh yavleniy dlya opredeleniya obema remonta transformatorov [Use of improved methods for electromagnetic phenomena bit locations to determine the amount of repair transformers]. *Elektro*, 2004, vol. 5, pp. 19–24.
16. Dolin A.P., Tsvetaev S.K., Ponochocko Ch., Ponochocko A. Akusticheskaya lokatsiya elektricheskikh razryadov v izmeritelnykh transformatorakh [Acoustic location of electrical discharges in instrument transformers]. *Electro*, 2005, vol. 2, p. 27–31.
17. Botyayev Yu.V., Mikheev A.G., Khramtsev A.N. Diagnostika vysokovoltного oborudovaniya podstantsiy [Diagnosis of high-voltage substation]. *Trudy Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Povyshenie effektivnosti raboty energosistem*, 2001, vol. 4, pp. 291–294.
18. Vinogradova L.V. *Ekspertnaya podderzhka protsessov proektirovaniya i diagnostiki silovykh transformatorov. Avtoreferat Dis. Kand. nauk* [Expert support of design and diagnostics of power transformers. Cand. Diss. Abstract]. Ivanovo, 1996. 18 p.
19. Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1998, vol. 4, pp. 15–20.
20. Ovsyannikova A.G. Strategii TOiR i diagnostika oborudovaniya [MRO strategies and equipment diagnostics]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, vol. 2, pp. 140–142.
21. Lavrinovich V.A., Dobizha N.E., Pichugina M.T., Nizkodobov G.A. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low voltage impulse. *9th International Forum on Strategic Technology*. Bangladesh, 2014. pp. 382–385.
22. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of Advanced Control State Technology of Transformer and Electric Motor Windings Based on Pulsed Method. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering»*, 2012, vol. 4, pp. 149–153.
23. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering»*, 2014, vol. 6, pp. 145–147.
24. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, pp. 2041–2045.
25. Strugov V.V., Lavrinovich V.A. Detection of partial discharge in DC motors by pulse method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 1, no. 12, pp. 72–77. In Rus.
26. Lavrinovich V.A., Strugov V.V. *Ustroystvo dlya obnaruzhenia chastichnykh razryadov* [Device for detection of partial discharge]. Patent RF, no. 2553281, 2015.
27. Amelina M.A., Amelin S.A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2007. 458 p.
28. Kuchinskiy G.S. *Chastichnye razryady v vysokovoltnykh konstruktivnykh* [Partial discharges in high voltage designs]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
29. Vdoviko V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovoltного oborudovaniya* [Partial discharges in diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 41 p.

Received: 2 December 2016.

Information about the authors

Vyacheslav V. Strugov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery A. Lavrinovich, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 519.688:622.276

АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ МЕТОДОМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Сергеев Виктор Леонидович¹,

SergeevVL@ignd.tpu.ru

Нгуен Куинь Хаи¹,

kennho321988@gmail.com.

Нгуен Тхак Хоай Фьонг¹,

nguyenphuongtpu1512@gmail.com.

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения информативности методов идентификации и прогнозирования эволюционных процессов жизненного цикла систем на основе феноменологических моделей в условиях неопределенности при ограниченных объемах исходных данных.

Цель исследования: разработка моделей и алгоритмов адаптивной идентификации жизненного цикла систем на основе феноменологических моделей с переменными параметрами, с учетом дополнительной априорной информации.

Методы исследования. Использованы теоретические и практические разработки в области системного анализа, моделирования и идентификации систем с учетом дополнительной априорной информации, методов оптимизации функций и линейной алгебры. Решение задач проводилось теоретически и на основе промысловых данных и экспертных оценок показателей объектов разработки газовых месторождений России.

Результаты. Разработаны модели и алгоритмы адаптивной идентификации эволюционных процессов жизненного цикла на основе нелинейных интегрированных систем феноменологических моделей с переменными параметрами с учетом дополнительной априорной информации и экспертных оценок. Для решения задачи идентификации использован метод локальной аппроксимации функций. Процесс адаптации феноменологических моделей жизненного цикла систем представлен в виде решения двух оптимизационных задач по определению параметров феноменологических моделей и управляющих параметров. Предложенный метод адаптации с учетом априорной информации позволяет синтезировать достаточно широкий спектр известных и новых алгоритмов адаптивной идентификации линейных и нелинейных феноменологических моделей жизненного цикла систем в условиях априорной неопределенности при малом объеме исходных данных. Показано, что в условиях неопределенности при ограниченном объеме промысловых данных разработанные феноменологические модели с переменными параметрами, алгоритмы идентификации, оценки прогноза годовой добычи газа и извлекаемых запасов газовых месторождений более точны и устойчивы по сравнению с феноменологическими моделями с постоянными параметрами и полученными на их основе алгоритмами идентификации и прогноза.

Ключевые слова:

Идентификация, адаптация, интегрированные системы феноменологических моделей с переменными параметрами, жизненный цикл систем, априорная информация, прогнозирование, оценка извлекаемых запасов, нефтяные и газовые месторождения.

Введение

В настоящее время для прогнозирования эволюционных процессов жизненного цикла систем (ЭП ЖЦС) большое внимание уделяется феноменологическим моделям (текущая емкость рынка инновационного товара, накопленная добыча нефти и газа в процессе разработки месторождений углеводородов, забойные давления при гидродинамических исследованиях скважин на неустановившихся режимах фильтрации и т. п.) [1–10]. Примеры простых, наиболее широко используемых феноменологических моделей ЭП ЖЦС приведены в табл. 1.

Следует отметить, что, несмотря на простой вид феноменологических моделей, приведенных в табл. 1, решение обратных задач структурной и параметрической идентификации по выбору подпадающей модели и оценке их параметров с использованием традиционных методов идентификации (наименьших квадратов, максимального правдо-

подобия, методов регуляризации и т. д.) вызывает значительные трудности, особенно на ранней стадии ЭП ЖЦС при ограниченных объемах исходных данных.

Для решения задачи параметрической идентификации в [9] предлагается использовать интегрированные системы феноменологических моделей (ИСФМ) с учетом дополнительной априорной информации, что обеспечивает устойчивость и значительно повышает точность оценок на ранних этапах ЖЦС. В целях упрощения решения задачи структурной идентификации в [11] предлагается использовать линейные ИСФМ с переменными параметрами. Показано, что алгоритмы идентификации линейных ИСФМ с переменными параметрами практически не уступают по точности алгоритмам идентификации, полученным с использованием более сложных нелинейных феноменологических моделей с постоянными параметрами, что значительно упрощает решение задачи структур-

Таблица 1. Феноменологические модели эволюционных процессов жизненного цикла систем

Table 1. Phenomenological models of evolutionary processes of a system lifecycle

Модели Models	Решения Solutions	Решения, приведенные к линейному виду Solutions in linear form
Логистическая Logistic $dV/dt = \alpha_1 V - \alpha_2 V^2$	$V = \frac{V_k}{1 + \left(\frac{V_k}{V_0} - 1\right) e^{-\alpha_1 t}},$ $V_\infty = \alpha_1 / \alpha_2 = V_k$	$V = \beta_1 - \beta_2 Z, Z = Q/V$ $\left(V_\infty = \beta_1, \beta_1 = \alpha_1 / \alpha_2, \beta_2 = 1 / \alpha_2\right)$
Бергаланфи Bertalanffy $dV/dt = AV^{1-l} (V_\infty^l - V^l)$	$V = V_\infty \left(1 - e^{-At}\right)^{1/l}$	$\frac{\sum_{i=1}^t \frac{dQ}{dt} \frac{V}{Q^2} \Delta t}{t} = K - Al \frac{\sum_{i=1}^t \frac{V}{Q} \Delta t}{t}$ $(K > 0; l < 1; K + l = 1)$
Гомпертц Gomperts $dV/dt = \gamma V \ln\left(\frac{A}{V}\right)$	$V = A e^{-\left(\frac{\alpha}{\gamma} e^{-\gamma t}\right)}$	$\frac{Q}{V} = \gamma \ln A - \gamma \ln V$ $(V_\infty = A)$
Эволюционное дифференциальное уравнение «насыщения» Evolution differential equations of «saturation» $dV/dt = A(V_\infty - V)^\alpha$	$V = V_\infty - [(1 - \alpha)(C - At)]^{1/(1-\alpha)}$ при $\alpha \neq 1$ $V = V_\infty - C e^{-At}$ при $\alpha = 1$	$\frac{\sum_{i=1}^t \left(\sum_{i=1}^t Q \Delta t \right) \Delta t}{t} = V_\infty + \alpha \frac{\sum_{i=1}^t (Q^2 / (dQ/dt)) \Delta t}{t}$
Кольрауш Kohlrusch $dV/dt = V \frac{\alpha}{t^\gamma}$	$V = A e^{\frac{\alpha(\gamma-1)}{t^{\gamma-1}}}$	$\ln \frac{Q}{V} = \ln \alpha - \gamma \ln t$

ной идентификации. Однако вопросы проектирования адаптивных алгоритмов идентификации нелинейных ИСФМ ЭП ЖЦС с переменными параметрами с учетом априорной информации остаются открытыми.

В данной работе для моделирования и прогнозирования ЭП ЖЦС предлагаются и исследуются нелинейные ИСФМ с переменными параметрами и алгоритмы адаптивной идентификации с учетом априорной информации.

Модели и алгоритмы адаптивной идентификации ЭП ЖЦС

Основой алгоритмов адаптивной идентификации ЭП ЖЦС является ИСФМ с переменными параметрами $\alpha(t)$ с учетом дополнительной априорной информации вида:

$$\begin{cases} y^*(t) = f_0(t, \alpha(t)) + \xi(t), \\ \bar{z}_{j,t} = f_{a,j}(t, \alpha(t)) + \eta_j(t), j = \overline{1, p}, t \in [t_0, t_k], \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha(t) = (\alpha_j(t), j = \overline{1, m})$ – неизвестные однозначные функции времени t ; $y^*(t), f_0(t, \alpha(t))$ – фактические и вычисленные на основе модели $f_0(t, \alpha(t))$ значения исследуемого эволюционного процесса; $f_{a,j}(t, \alpha(t)), j = \overline{1, p}$ – модели объектов аналогов, позволяющих

учитывать дополнительную априорную информацию $\bar{z}_{j,t}, j = \overline{1, p}$, известную к моменту времени t . Модели исследуемого процесса и модели объектов аналогов $f_0(t, \alpha(t)), f_{a,j}(t, \alpha(t))$ – известные функции (функционалы); $\xi(t), \eta_j(t)$ – случайные неконтролируемые факторы (процессы); t_0, t_k – моменты времени начала и завершения эволюционного процесса $y^*(t)$.

Для решения задачи идентификации (1) используем метод локальной аппроксимации, представляя модели $f_0(t, \alpha(t)), f_{a,j}(t, \alpha(t))$ с переменными параметрами функциями $f_0(t, \alpha^*(t)), f_{a,j}(y(t), \alpha^*(t))$ с постоянными параметрами $\alpha^*(t)$ в окрестности некоторой точки $t^* \in [t_0, t_k]$. Параметры $\alpha^*(t)$ могут быть определены с использованием наблюдений $y^*(t_i), i = \overline{1, n}$, эволюционного процесса $y^*(t)$ на интервале $(t^* - \tau) \in [t_0, t_k]$, сформированного с помощью весовой функции $w((t^* - \tau)/h(t^*))$ с параметром забывания $h(t^*)$ [11–13].

Процесс адаптивной идентификации (1) при $t^* = t_n$ можно представить в виде последовательного решения оптимизационных задач вида [12–14]

$$\alpha_n^* (\beta_n, \gamma_n, h_n) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(t_n, \alpha_n, \beta_n, \gamma_n, h_n), \quad (2)$$

$$\beta_n^*, \gamma_n^*, h_n^* = \arg \min_{\beta_n, \gamma_n, h_n} (J_0(\alpha_n^*(\beta_n, \gamma_n, h_n))), \quad (3)$$

где запись $\arg \min_x f(x)$ означает точку минимума

x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min_x f(x)$);

$$\Phi(t_n, \alpha_n, \beta_n, \gamma_n, h_n) = \Phi(J_0(t_n, \alpha_n, h_n), J_{a,i}(\alpha_n, \beta_n, \gamma_n))$$

– комбинированный эмпирический показатель качества ИСФМ (1), представляющий заданную функцию (функционал) Φ от частного показателя качества системы моделей эволюционного процесса $y^*(t)$

$$J_0(t_n, \alpha_n) = \sum_{i=1}^n w((t_n - t_i) / h_n) \psi_0(y^*(t_i) - f_0(t_i, \alpha_n))$$

и частного критерия качества моделей объектов аналогов

$$J_a(\alpha_n, \beta_n, \gamma_n) = \sum_{j=1}^p \beta_{j,n} \psi_{a,j}(\gamma_{n,j} \cdot \bar{z}_{j,n} - f_{a,j}(\alpha_n)),$$

где $\beta_n = (\beta_{j,n}, j = \overline{1, p})$ – вектор управляющих параметров, определяющих значимость (вес) дополнительных априорных сведений $\bar{z}_{j,n}$; $\gamma_n = (\gamma_{j,n}, j = \overline{1, p})$ – вектор параметров корректировки экспертных оценок $\bar{z}_{j,n}$; $\Phi, \psi_0, \psi_{a,j}$ – известные функции (функционалы).

Отметим, что рассматриваемая технология (1)–(3) позволяет синтезировать достаточно широкий спектр известных и новых алгоритмов адаптивной идентификации для линейных и нелинейных интегрированных систем феноменологических моделей и моделей объектов аналогов, а также для различных показателей качества, определяемых функциями $\Phi, \psi_0, \psi_{a,k}$.

Например, для ИСФМ (1) при использовании метода оптимизации Гаусса–Ньютона оптимизационная задача (2) (по аналогии с [12, 13]) сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений вида

$$A_n \cdot \Delta \alpha_{(i-1)n}^* = B_n, i = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$A_n = (D_{0,n}^T K(h_n) D_{0,n} + D_{a,n}^T W(\beta_n) D_{a,n})_{(i-1)n},$$

$$B_n = (D_0^T K(h_n) e_{0n} + D_{a,n}^T W(\beta_n) e_{a,n}(\gamma_n))_{i-1}$$

на каждом шаге итерационного процесса с номером i

$$\alpha_{i,n}^* = \alpha_{i-1,n}^* + \delta_{i,n} \Delta \alpha_{(i-1)n}^*,$$

где

$$D_{0,n} = \left(\frac{\partial f_0(t_i, \alpha_n)}{\partial \alpha_{j,n}}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m} \right)_{n,m},$$

$$D_{a,n} = \left(\frac{\partial f_{a,k}(t_n, \alpha_n)}{\partial \alpha_{j,n}}, k = \overline{1, p}, j = \overline{1, m} \right)_{p,m}$$

– матрицы частных производных от модели ЭП ЖЦС и моделей объектов аналогов;

$$e_{0n} = (y_i^* - f_0(t_i, \alpha_n), i = \overline{1, n}),$$

$$\bar{e}_{a,n}(\gamma_n) = (\gamma_{n,j} \cdot \bar{z}_{j,n} - f_{a,j}(\alpha_n), j = \overline{1, p})$$

– векторы невязок; $\delta_{i,n}$ – параметр шага;

$$W(\beta_n) = \text{diag}(\beta_{1,n}, \beta_{2,n}, \dots, \beta_{p,n}),$$

$$W(\gamma_n) = \text{diag}(\gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}, \dots, \gamma_{p,n}),$$

$$K(h_n) = \text{diag}(w((t_n - t_i) / h_n), i = \overline{1, n})$$

– диагональные матрицы управляющих параметров, переменных корректировки экспертных оценок и значений весовой функции $w((t_n - \tau) / h(t_n))$ в моменты времени $t_i, i = \overline{1, n}$.

Отметим, что при матрице весовых функций $K(h_n) = I$ и матрице параметров корректировки экспертных оценок $W(\gamma_n) = I$ (I – единичная диагональная матрица) оценки (4) совпадают с приближениями, полученными для ИСФМ с постоянными параметрами при $\alpha(t) = \alpha$ [9]. При дополнительных априорных данных, равных нулю, $\bar{z}_n = 0, K(h_n) = I, W(\gamma_n) = I$ и $W(\beta) = \beta I$ из (4) следуют оценки параметров нелинейных функций с параметром регуляризации β [9, 14–18]

$$\begin{cases} \alpha_i^* = \alpha_{i-1}^* + h_i \Delta \alpha_{i-1}^*, i = 1, 2, 3, \dots, \\ (D_0^T D_0 + \beta I)_{i-1} \cdot \Delta \alpha_{i-1}^* = (D_0^T e_0)_{i-1}, \end{cases}$$

Для линейных ИСФМ с переменными параметрами решение оптимизационной задачи (2) приведено в [11].

Следует также отметить, что оптимизационная задача (3) не имеет аналитического решения и оценки управляющих параметров, переменных корректировки экспертных оценок и параметра забывания следует определять методом последовательных приближений.

Адаптивная идентификация и прогнозирование процесса добычи газа

На рис. 1–6 и в табл. 2, 3 приведены результаты решения актуальной задачи прогноза добычи газа и оценки извлекаемых запасов по промышленным данным разработки Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения (ГКМ) и залежи J1-I Толон-Мастахского ГКМ с использованием моделей и алгоритмов (1)–(4). В качестве дополнительной априорной информации в (1) использовалась экспертная оценка извлекаемых запасов $\bar{z}(t_0)$ с последующей корректировкой.

На рис. 1, 2 приведены результаты прогноза годовой добычи газа $\hat{Q}_n(t_n + \tau)$ Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения (А-Т ГКМ)

$$\begin{aligned} & \hat{Q}_n(t_n + \tau, \alpha_n^*(r_n^*)) = \\ & = \hat{y}(t_n + \tau, \alpha_n^*(r_n^*)) - \hat{y}(t_n + \tau - 1, \alpha_n^*(r_n^*)), n = 4, 5, 6 \quad (5) \end{aligned}$$

$$y(t) = f_0(t, \alpha(t)) = \alpha_1(t)(1 - \exp(\alpha_2(t) \cdot t))^{\alpha_3(t)} \quad (6)$$

с постоянными параметрами при $\alpha(t) = \alpha$ (рис. 1) и переменными параметрами (рис. 2).

На рис. 3, 4 приведены результаты прогноза годовой добычи газа (5) Толон-Мастахского газоконденсатного месторождения (J1-I Т-М ГКМ) после 4,

5, 6 и 7 лет разработки (линии 2–5), полученные при использовании логистической модели [5, 19]

$$y(t) = f_0(t, \alpha(t)) = \alpha_1(t) / (1 + \exp(-\alpha_2(t) \cdot t)) \quad (7)$$

с постоянными параметрами $\alpha(t) = \alpha$ (рис. 3) и с переменными параметрами (рис. 4).

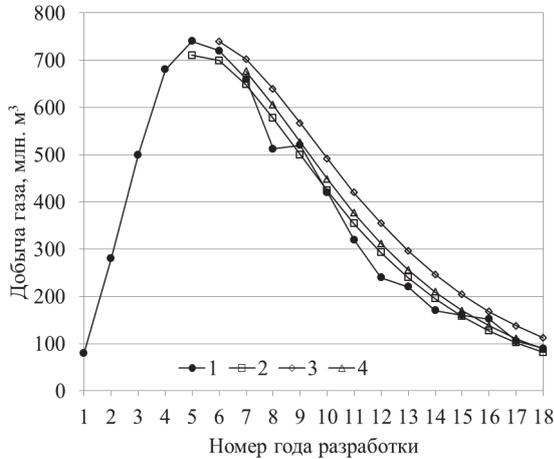


Рис. 1. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи газа на основе модели Берталанфи с постоянными параметрами (линии 2–4) по данным шести лет разработки

Fig. 1. Real (line 1) and predicted values of gas production on the basis of Bertalanffy model with constant parameters (lines 2–4) according to six years of exploitation

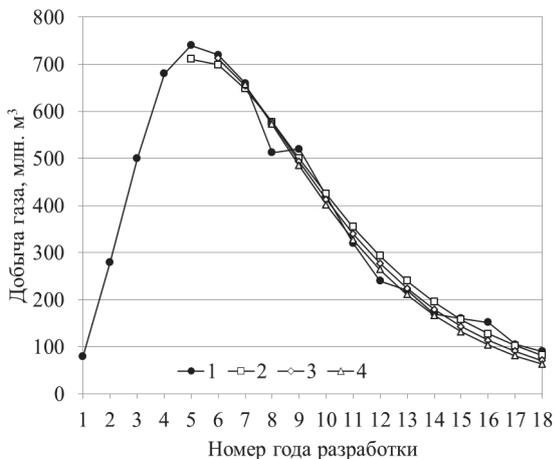


Рис. 2. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи газа на основе модели (6) с переменными параметрами (линии 2–4) по данным шести лет разработки

Fig. 2. Real (line 1) and predicted values of gas production on the basis of model (6) with variable parameters (lines 2–4) according to six years of exploitation

На рис. 5, 6 приведены результаты прогноза годовой добычи газа (5) Толон-Мастахского газоконденсатного месторождения (J1-I T-M ГКМ) после 3, 4, 5 и 6 лет разработки (линии 2–5), полученные с использованием в (1) модели Гомпертца [19]

$$y(t) = f_0(t, \alpha(t)) = \alpha_1(t) (\exp(-1/\alpha_2(t)) \cdot e^{-\alpha_2(t)t}) \quad (8)$$

с постоянными (рис. 5) и переменными параметрами (рис. 6).

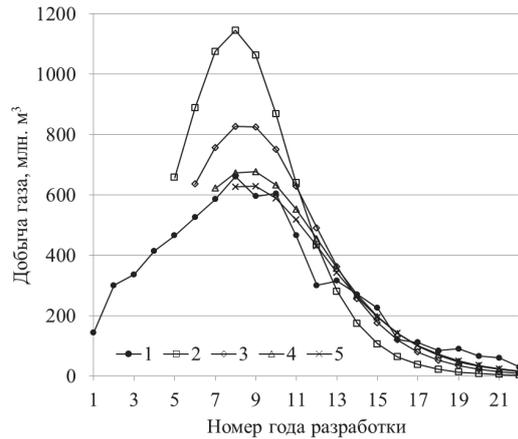


Рис. 3. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи газа на основе логистической модели с постоянными параметрами (линии 2–5) по данным семи лет разработки

Fig. 3. Real (line 1) and predicted values of gas production on the basis of logistic model with constant parameters (lines 2–5) according to seven years of exploitation

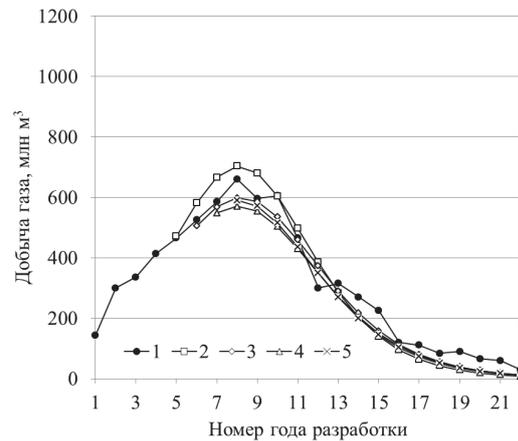


Рис. 4. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи газа на основе модели (7) с переменными параметрами (линии 2–5) по данным семи лет разработки

Fig. 4. Real (line 1) and predicted values of gas production on the basis of model (7) with variable parameters (lines 2–5) according to seven years of exploitation

Оценки параметров $\alpha_n^*(r_n^*)$ (5) феноменологических моделей (6)–(8) получены с использованием алгоритма (4) при $r_n^* = (\beta_n^*, \gamma_n^*, h_n^*)$. Решение оптимизационной задачи (3) по выбору управляющего параметра β_n^* , параметра корректировки экспертной оценки извлекаемых запасов газа γ_n^* и параметра забывания h_n^* проводилась методом деформированного многогранника [20] с использованием квадратичного показателя качества

$$J_0(t_n, \alpha_n^*(r_n^*)) = \sum_{i=1}^n w((t_n - t_i) / h_n^*) (y^*(t_i) - f_0(t_i, \alpha_n^*(r_n^*)))^2.$$

В табл. 2, 3 приведены относительные ошибки δQ_n оценок прогноза добычи (5) и относительные ошибки δS_n оценок извлекаемых запасов газа

$S_n^* = \alpha_{1,n}^*(r_n^*)$ Анастасиевско-Троицкого ГКМ и залежи J1-I Толон-Мастахского ГКМ, полученные на основе ИСФМ (1) и моделей (6)–(8) с постоянными и переменными параметрами

$$\delta Q_n = \left| \frac{Q_n^*(t_{n+\tau}) - \hat{Q}_n(t_{n+\tau})}{Q_n^*(t_{n+\tau})} \right|, \quad \delta S_n^* = \left| \frac{S - S_n^*}{S} \right|,$$

где $Q_n^*(t_{n+\tau})$, S – фактические значения годовой добычи газа и извлекаемых запасов.

Отметим, что фактические значения извлекаемых запасов за все время разработки Анастасиевско-Троицкого ГКМ составили $S = 6,9 \cdot 10^9 \text{ м}^3$, а залежи J1-I Толон-Мастахского ГКМ – $S = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^3$. Априорная информация об начальных извлекаемых запасах для двух месторождений выбиралась равной $\bar{z}(t_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ с ошибкой порядка 30 %.

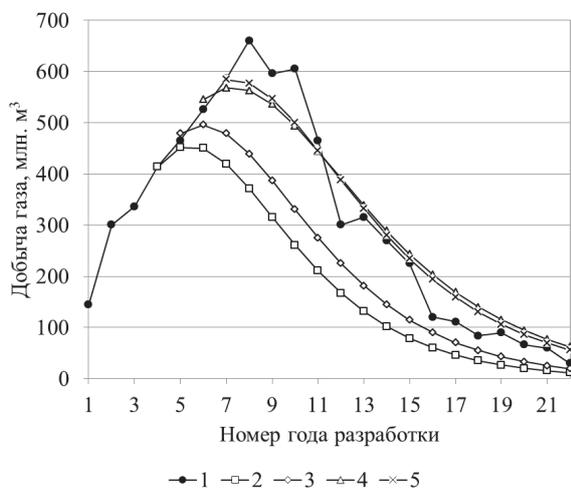


Рис. 5. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи газа на основе модели Гомпертца с постоянными параметрами (линии 2–5) по данным семи лет разработки

Fig. 5. Real (line 1) and predicted values of gas production on the basis of Gompertz model with constant parameters (lines 2–5) according to seven years of exploitation

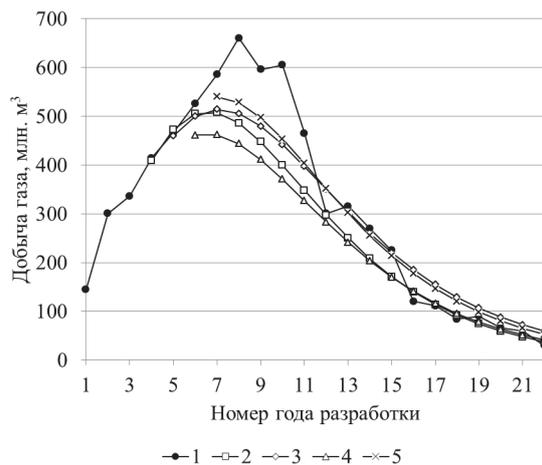


Рис. 6. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи газа на основе модели (8) с переменными параметрами (линии 2–5) по данным семи лет разработки

Fig. 6. Real (line 1) and predicted values of gas production on the basis of model (8) with constant parameters (lines 2–5) according to seven years of exploitation

Из табл. 2, 3 видно, что оценки прогноза добычи газа и извлекаемых запасов, полученные на основе метода адаптивной идентификации с использованием нелинейных ИСФМ с переменными параметрами (1) и алгоритмов адаптивной идентификации (4), более точны по сравнению с аналогичными оценками, полученными на основе ИСФМ с постоянными параметрами.

Выводы

- Для решения задачи идентификации и прогнозирования эволюционных процессов жизненного цикла систем предложено использовать нелинейные интегрированные системы феноменологических моделей с переменными параметрами с учетом дополнительной априорной информации и алгоритмы адаптивной идентификации.

Таблица 2. Относительные ошибки извлекаемых запасов газа

Table 2. Relative errors of recoverable gas reserves

Модели Models	Параметры Parameters	Объект разработки Exploitation object	Номер года разработки Years of exploitation					
			3	4	5	6	7	8
Берталанфи (нелинейные ИСФМ) Bertalanffy (nonlinear ISFM)	Постоянные Constant	А-Т ГКМ A-T GCM	–	0,009	0,136	0,053	0,020	0,058
	Переменные Variable		–	0,008	0,011	0,032	0,026	0,151
Логистическая (линейные ИСФМ) Logistic (linear ISFM)	Постоянные Constant	J1-I T-M ГКМ J1-I T-M GCM	0,240	0,202	0,169	0,143	0,125	0,108
Логистическая (нелинейные ИСФМ) Logistic (nonlinear ISFM)	Переменные Variable		–	0,241	0,102	0,011	0,023	0,033
Гомпертц (линейные ИСФМ) Gomperts (linear ISFM)	Постоянные Constant		0,371	0,264	0,029	0,045	0,026	0,028
Гомпертц (линейные ИСФМ) Gomperts (linear ISFM)	Переменные Variable		0,143	0,045	0,172	0,014	0,018	0,015

Таблица 3. Относительные ошибки оценок прогноза добычи
Table 3. Relative errors of estimates of predicted production

Модели Models	Параметры Parameters	Объект разработки Exploitation object	Номер года разработки Years of exploitation					
			3	4	5	6	7	8
Берталанфи (нелинейные ИСФМ) Bertalanffy (nonlinear ISFM)	Постоянные Constant	А-Т ГКМ A-T GCM	–	0,016	0,005	0,001	0,019	0,008
	Переменные Variable		–	0,016	0,004	0,001	0,015	0,011
Логистическая (линейные ИСФМ) Logistic (linear ISFM)	Постоянные Constant	J1-I T-M ГКМ J1-I T-M GCM	0,115	0,121	0,108	0,087	0,063	0,063
Логистическая (нелинейные ИСФМ) Logistic (nonlinear ISFM)	Переменные Variable		0,116	0,050	0,013	0,010	0,004	0,008
Гомпертц (линейные ИСФМ) Gomperts (linear ISFM)	Постоянные Constant		0,001	0,008	0,009	0,001	0,024	0,012
Гомпертц (линейные ИСФМ) Gomperts (linear ISFM)	Переменные Variable		0,004	0,004	0,029	0,017	0,018	0,007

- Предложена технология синтеза широкого спектра известных и новых оптимальных алгоритмов адаптивной идентификации эволюционных процессов жизненного цикла систем на основе интегрированных систем феноменологических моделей с переменными параметрами.
- На примерах эволюционных процессов добычи газа показано, что адаптивные алгоритмы

прогноза годовой добычи газа и оценки извлекаемых запасов на основе интегрированных нелинейных систем феноменологических моделей с переменными параметрами более точны по сравнению с аналогичным оценкам, полученным с использованием феноменологических моделей с постоянными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кожухова В.Н., Семеновичев Е.В. Методы идентификации логистической динамики и жизненного цикла продукта моделью Верхулста // Экономика и математические методы. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 108–115.
- Соколов В.А. Эволюционные уравнения как феноменологические модели разработки нефтяных залежей // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2006. – № 2. URL: http://ogbus.ru/authors/SokolovVA/SokolovVA_1.pdf (дата обращения 28.05.2014).
- Хасанов М.М., Карачурин Н.А., Тяжев Е.А. Оценка извлекаемых запасов на основе феноменологических моделей // Вестник инженерного центра ЮКОС. – 2001. – № 2. – С. 3–7.
- Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Нелинейность. Неравномерность. Неопределенность. – М; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 386 с.
- Семеновичев В.К., Коробецкая А.А., Кожухова В.Н. Предложения экономического инструментария моделирования и прогнозирования эволюционных процессов: монография. – Самара: САГМУ, 2015. – 384 с.
- Possible Trends of Chinese Oil Supply through 2030 / L. Feng, Y. Hu, Ch. Hall, J. Wang // The Chinese Oil Industry. Briefs in Energy. – 2013. – P. 47–69.
- Li J., Zheng Y., Lin Zh. Recursive identification of time-varying systems: Self-tuning and matrix RLS algorithms // Systems & Control Letters. – 2014. – V. 66. – P.104–110.
- Goldfeld S.M., Quandt R.E. Nonlinear methods in econometrics. – Amsterdam: North-Holland, 1977. – 452 p.
- Наймушин А.Г., Сергеев В.Л. Идентификация эволюционных процессов жизненного цикла систем с учетом априорной информации // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 42–45.
- Сергеев В.Л., Наймушин А.Г. Оценка извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений адаптивным методом падения давления // Газовая промышленность. Вузовская наука нефтегазовой отрасли. – 2013. – № 695. – С. 79–81.
- Сергеев В.Л., Наймушин А.Г., Нгуен Куинь Хаи. Адаптивная идентификация эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе интегрированных систем феноменологических моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 323. – № 1. – С. 177–183.
- Polishchuk V.I., Sergeev V.L. Adaptive Identification Method of a Signal from Stray Magnetic Field Sensor for Turbogenerator Diagnostics // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2015. – № 8 (2). – P. 201–207.
- Sergeev V.L., Kalayda V.T., Polishchuk V.I. Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty // International Siberian Conference on Control and Communications. – Moscow, Russia, 2016. – P. 265–268.
- Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 198 с.
- Haykin S. Adaptive Filter Theory. – NJ, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002. – 590 p.
- Ljung L. System Identification: Theory for the User. – NJ, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. – 519 p.
- Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The Influence of the Design Method for Induction Motor with Stationary Rotor on Identification of its Parameter // International Siberian Conference on Control and Communications. – Omsk, Russia, 2015. – P. 193–199.
- Tikhonov A., Arsenin V. Solutions of Ill-Posed Problems. – New York: Wiley, 1977. – 272 p.
- Chilingar G.V., Gorfunkel M.V., Knoring L.D. Strategies for Optimizing Petroleum Exploration: Evaluate Initial Potential and Forecast Reserves. – Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999. – 368 p.
- Koshel R.J. Enhancement of the downhill simplex method of optimization // International Optical Design Conference. – Tucson, Arizona United States, 2002. – V. 4832. – P. 270–282.

Поступила 30.09.2016 г.

Информация об авторах

Сергеев В.Л., доктор технических наук, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Нгуен Куинь Хаи, магистр кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Нгуен Тхак Хоай Фьонг, аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 519.688:622.276

ADAPTIVE IDENTIFICATION OF SYSTEM LIFECYCLE BY THE METHOD OF INTEGRATED PHENOMENOLOGICAL MODELS WITH VARIABLE PARAMETERS

Viktor L. Sergeev¹,
SergeevVL@ignd.tpu.ru

Huy Q. Nguyen¹,
kennho321988@gmail.com

Phuong T.H. Nguyen¹,
nguyenphuongtpu1512@gmail.com

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

The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase information content of identification methods and predicting evolutionary processes of the system lifecycle based on phenomenological models under uncertainty with limited amounts of initial data.

The main aim of the study is to develop the models and algorithms for adaptive identification in evolutionary processes of the system lifecycle based on phenomenological models with variable parameters and with a priori information.

The methods used in the study are theoretical and practical developments in system analysis, system modeling, and identification with additional prior information, optimization methods of functions and linear algebra. The problem was solved theoretically based on the filed data and expert estimates of performance indicators of gas fields exploitation objects in Russia.

The results. The authors have proposed to develop the models and algorithms for adaptive identification in evolutionary processes of the system lifecycle based on non-linear integrated systems of phenomenological models with variable parameters, additional a priori information and expert estimates. To solve the identification problems the authors used the local approximation function method. Adaptive process of phenomenological models of the system lifecycle is introduced in the form of two optimization problems solutions by determining phenomenological models parameters and control parameters. The proposed adaptive method, taking into account a priori information, allows synthesizing a wide range of the known and new algorithms for adaptive identification of linear and nonlinear phenomenological models of system lifecycle in the condition of a priori uncertainty with small amount of input data. It is shown that under uncertainty with limited field data the development of phenomenological models with variable parameters, identification algorithms, prediction of annual gas production and recoverable reserves of gas fields are more accurate and stable in comparison with phenomenological models with constant parameters measured on the basis of their identification algorithms and prediction.

Key words:

Identification, adaptation, integrated systems of phenomenological models with variable parameters, system lifecycle, a priori information, prediction, estimated recoverable reserves, oil and gas fields.

REFERENCES

1. Kozhukhova V.N., Semenychev E.V. Identification methods for logical dynamic and product life cycle by the Verhulst model. *Ekonomika i matematicheskie metody – Economics and mathematical methods*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 108–115. In Rus.
2. Sokolov V.A. Evolyutsionnye uravneniya kak fenomenologicheskie modeli razrabotki neftyanykh zalezhey [Evolution equations as phenomenological models of development of oil fields]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2006, pp. 1–36. Available at: http://ogbus.ru/authors/SokolovVA/SokolovVA_1.pdf (accessed 28 May 2014).
3. Khasanov M.M., Karachurin N.A., Tyazhev E.A. Estimation of recoverable reserves based on phenomenological models. *Vestnik inzhenernogo tsentra YuKOS – Bulletin of Engineering Center YuKOS*, 2001, no. 2, pp. 3–7. In Rus.
4. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Modelirovanie protsessov neftegazodobychi. Nelineynost. Neravnovesnost. Neopredelennost* [Modelling of oil and gas production processes. Nonlinearity. Nonequilibrium. Uncertainty]. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Science, 2004. 386 p.
5. Semenychev V.K., Korobetskaya A.A., Kozhukhova V.N. *Predlozheniya ekonomicheskogo instrumentariya modelirovaniya i prognozirovaniya evolyutsionnykh protsessov: monografiya* [Suggestion of economic modeling and forecasting tools of evolutionary processes: monograph]. Samara, SamNTs RAN Publ., 2011. 364 p.
6. Feng L., Hu Y., Hall Ch., Wang J. Possible Trends of Chinese Oil Supply through 2030. *The Chinese Oil Industry. Briefs in Energy*, 2013, pp. 47–69.
7. Li J., Zheng Y., Lin Zh. Recursive identification of time-varying systems: Self-tuning and matrix RLS algorithms. *Systems & Control Letters*, 2014, vol. 66, pp. 104–110.
8. Goldfeld S.M., Quandt R.E. *Nonlinear methods in econometrics*. Amsterdam, North-Holland, 1977. 452 p.
9. Naymushin A.G., Sergeev V.L. Identification in evolutionary processes of life cycle considering prior information. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 42–45. In Rus.
10. Sergeev V.L., Naymushin A.G. Otsenka izvlekayemykh zapasov gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy adaptivnym metodom padeniya davleniya [Estimate of recoverable reserves of gas and gas-condensate fields by the adaptive pressure drop method]. *Gazovaya promyshlennost. Vuzovskaya nauka neftegazovoy otrasli – Gas Industry. University Science oil and gas industry*, 2013, no. 695, pp. 79–81.
11. Sergeev V.L., Naymushin A.G., Nguen Kuin Khui. Adaptive identification in evolutionary processes of oil and gas production based on integrated systems of phenomenological models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 323, no. 1, pp. 177–183. In Rus.
12. Polishchuk V.I., Sergeev V.L. Adaptive Identification Method of a Signal from Stray Magnetic Field Sensor for Turbogenerator Di-

- agnostics. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2015, no. 8 (2), pp. 201–207.
13. Sergeev V.L., Kalayda V.T., Polishchuk V.I. Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty. *International Siberian Conference on Control and Communications*. Moscow, Russia, 2016. pp. 265–268.
 14. Sergeev V.L. *Integrirovannyye sistemy identifikatsii* [Integrated identification system]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2011. 198 p.
 15. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 2002. 590 p.
 16. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1987. 519 p.
 17. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The Influence of the Design Method for Induction Motor with Stationary Rotor on Identification of its Parameter. *International Siberian Conference on Control and Communications*. Omsk, Russia, 2015. pp. 193–199.
 18. Tikhonov A., Arsenin V. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York, Wiley, 1977. 272 p.
 19. Chilingar G.V., Gorfunkel M.V., Knoring L.D. *Strategies for Optimizing Petroleum Exploration: Evaluate Initial Potential and Forecast Reserves*. Houston, Texas, Gulf Publishing Company, 1999. 368 p.
 20. Koshel R.J. Enhancement of the downhill simplex method of optimization. *International Optical Design Conference*. Tucson, Arizona United States, 2002. Vol. 4832, pp. 270–282.

Received: 30 September 2016.

Information about the authors

Viktor L. Sergeev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Huy Q. Nguyen, master, National Research Tomsk Polytechnic University.

Phuong T.H. Nguyen, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 697.34

НОВАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ КОРРОЗИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Чичерин Станислав Викторович,

man_csv@hotmail.com

Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Актуальность и цель исследования. Системы трубопроводного транспорта широко применяются для обеспечения потребителем ресурсов разного назначения. Особенно большое значение они имеют для надежной передачи энергоносителей. Поэтому задача сокращения риска возникновения аварийных ситуаций и снижения отказов в работе элементов и участков трубопроводных систем посредством своевременного выявления и устранения возникающих дефектов является актуальной. Разработанная методика определения местоположения зон развития наружной коррозии апробирована применительно к наиболее распространенному и разветвленному виду трубопроводной системы – тепловой сети, в которой происходит транспортирование и управление потоками гидроресурсов в виде пара или горячей воды.

Методы. Для указания точного местоположения пораженных коррозией участков при обследовании трубопроводной сети представлена новая методика, полученная в результате обобщения автором сведений из зарубежных публикаций в области геологоразведочных и инженерно-геологических исследований. В связи со спецификой объекта исследования настоящей работы классические средства получения сведений о подземных объектах были модернизированы для обследования подземных трубопроводов в городских условиях в соответствии с необходимостью измерений при значительном количестве смежных инженерных коммуникаций, находящихся в грунте.

Результаты. Полученные в соответствии с изложенной методикой результаты позволили выделить отрезки наиболее активного коррозионного поражения участка тепловой сети. Наиболее протяженный отрезок развития коррозии зафиксирован в интервале 24–34 м, он объединяет 5 локальных коррозионных зон различной интенсивности. Следующим по протяженности является отрезок 66–72 м, объединяющий 3 локальные коррозионные зоны. Для верификации полученных результатов были произведены контрольные замеры толщины стенки трубопровода в шурфе. Результаты замера толщины стенки трубопроводов в предложенных точках на расстоянии 28 и 72 м показали значительное утонение стенки: до 3,4 мм против изначальных 9 мм у новой трубы диаметром 720 мм. Исследование показало высокую достоверность метода, что в дальнейшем позволит без проведения контрольного вскрытия своевременно выявлять дефектные участки тепловых сетей.

Ключевые слова:

Централизованное теплоснабжение, электрохимический, теплоизоляция, дефект, остаточный ресурс, шурфовка.

Введение

Широкое применение систем трубопроводного транспортирования ресурсов разного назначения обеспечивает значительную часть потребностей промышленного производства и населения в энергоснабжении. Одной из важнейших задач в управлении потоками через трубопроводы является сокращение риска возникновения аварийных ситуаций, обеспечение безаварийной работы систем выработки и доставки энергоносителей потребителям, снижение количества отказов в работе участков трубопроводной сети [1]. Решение данной задачи на современном уровне возможно при реализации надежных диагностических методов, направленных на своевременное выявление дефектных участков, плановую замену участков теплопроводов, которые характеризуются максимальным износом [2]. Апробация соответствующей методики применительно к наиболее распространенному и разветвленному типу трубопроводной системы – тепловой сети, инжиниринг которой осложнен наличием смежных коммуникаций городской инфраструктуры жизнеобеспечения, является методом изучения в настоящей работе.

Краткие теоретические сведения и описание разработанной методики

Определение зон разрушения
изоляционного слоя теплопроводов

Основы этого метода разработаны в 40-х гг. 20-го столетия ученым Д. Пирсом (John R. Pierce). Так, с точки зрения электротехники трубопровод в изоляции может быть представлен в виде бесконечной цепочки последовательно соединенных сопротивлений, к узлам соединений которых иногда присоединены ответвления из сопротивлений различной величины, замыкающие трубу на землю [3]. Величина сопротивлений в последовательной цепочке определяется параметрами трубы – диаметром, толщиной стенок и длиной отрезка от ответвления до ответвления. В ответвлениях величина сопротивления формируется из сопротивления изоляции или, вернее, из переходного сопротивления и общего сопротивления отходящих трубопроводов, если они есть. В зависимости от вида подсоединенного тока (постоянный или переменный) величина сопротивлений может быть чисто активной или комплексной, т. е. зависящей от частоты тока. Для относительно низких частот – единицы

и первые сотни герц – с большой долей вероятности можно считать все сопротивления активными (постоянными).

Сила тока в трубе при наличии утечек тока уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону:

$$J_x = J_0 e^{-\beta x}, \quad (1)$$

где J_0 – сила тока в точке подсоединения источника (генератора); J_x – сила тока в точке трубопровода, на расстоянии x от точки присоединения генератора; β – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания является интегральным параметром, характеризующим изоляционное покрытие трубы на отрезке $[X_1, X_2]$. Суммарное электромагнитное поле токов утечек исследуют на дневной поверхности, измеряя электрический потенциал или различные составляющие градиента потенциала и магнитного поля токов.

Величина потенциала от единичного нарушения изоляции определяется следующими выражениями [4]:

по линии на поверхности над осью трубы –

$$U_x = \frac{J\rho}{4\pi L} \ln \left(\frac{x+L + \sqrt{h^2 + (x+L)^2}}{x-L + \sqrt{h^2 + (x-L)^2}} \right), \quad (2)$$

по линии на поверхности поперек оси трубы –

$$U_y = \frac{J\rho}{4\pi L} \ln \left(\frac{\sqrt{h^2 + y^2 + L^2} + L}{\sqrt{h^2 + y^2 + L^2} - L} \right), \quad (3)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление вмещающего грунта (Ом·м); J – ток, стекающий с трубопровода во вмещающую среду, А; h – глубина залегания трубопровода, м; x и y – расстояния от проекции на поверхности земли точки центра нарушения изоляции до точки измерения по осям координат, м; L – длина нарушения изоляции, м.

Общее электромагнитное поле трубопровода будет определяться суммой полей токов со всех нарушений изоляции, отводов и пересечений [5]. Точный математический расчет поля токов трубопровода пока представляет очень трудную задачу из-за чрезвычайной сложности окружающей обстановки и часто отсутствия данных о фактических деталях и конструктивных особенностях трубопроводов [6]. Тем не менее, анализ поведения измеряемых компонент электрического и магнитного поля трубопровода и их сочетание позволяет не только качественно определить наличие нарушения изоляции, но и очень часто количественно оценить величину переходного сопротивления.

По характеру распределения измеренной разности потенциалов делают заключение о наличии мест ослабления электрорезистивных свойств изоляции теплопровода, вплоть до прямого электролитического контакта трубопровода с грунтом [7, 8].

При наблюдениях на переменном токе в общем случае измеряют продольную и поперечную (относительно линии теплопровода) электрическую (ΔE_x и ΔE_y) и магнитную (H_x и H_y) составляющую поля [9].

Контролирующими признаками мест нарушения изоляции являются следующие:

- при наблюдении составляющих градиента электрического поля, независимо от способа наблюдения, места повышенной проводимости изоляции отмечаются максимумами составляющей ΔE_y при расположении одного из электродов над трубой и максимумами ΔE_x над краями места нарушения изоляции;
- при наблюдении магнитных составляющих составляющая H_y ступенчато понижается в каждом месте нарушения изоляции, соответственно части тока, утекающего из трубы в грунт, а составляющая H_x в таких местах имеет локальный максимум.

При анализе поведения составляющих ΔE_y , ΔE_x , H_x , H_y необходимо обязательно учитывать смену ориентировки приемных линий и антенн при поворотах трассы и в местах пересечений и отводах, чтобы избежать ложных выводов [10].

Количественная оценка степени нарушения изоляционного покрытия выполняется по значению параметра β , качественная – с учётом эффективных нормировочных отношений $\Delta E_y/H_y$, $\Delta E_x/H_x$ и $\Delta E_y/H_x$.

Оценка степени нарушения изоляционного покрытия выполняется по значениям эффективных параметров β и A :

$$A = \Delta E_y/H_y. \quad (4)$$

Величина коэффициента затухания β пропорциональна логарифму отношения токовых значений J_x в различных точках трубопровода (1). В свою очередь, напряженность H магнитного поля линейного проводника с током также прямо пропорциональна силе тока:

$$H = J_x/2\pi h, \quad (5)$$

где h – расстояние от оси трубопровода до измерительной рамки.

Поэтому β определяется простым отношением магнитных составляющих поля трубы, наблюдаемых над трубопроводом [11]. В свою очередь, квадрат коэффициента затухания обратно пропорционален переходному сопротивлению. Это даёт возможность оценить величину последнего [12, 13].

Измерения электродного потенциала трубы

Для изучения электрических полей, обусловленных наличием электрических токов в земле, создаваемых естественными электродвижущими силами электрохимического происхождения [14], проводятся измерения потенциала почвы по трассе обследуемого теплопровода по методу естественного поля (ЕП), аналогом которого в практике коррозионных измерений является способ измерения разности потенциалов «труба–земля» [15]. В настоящее время это единственный полевой метод [16], позволяющий непосредственно наблюдать и фиксировать наличие и развитие процессов внешней коррозии электрохимической природы. Используя опыт геологоразведочных и инженерно-геологических исследований, классический гео-

физический метод ЕП модернизирован для обследования подземных теплопроводов в городских условиях [17]. При измерениях по методу ЕП определяется разность потенциалов. Потенциал почвы над подземным металлическим сооружением характеризует существующее коррозионное состояние объекта [18].

Обработка результатов измерений, описание методики

Выделение зон развития коррозии проводится при совместной интерпретации материалов, полученных при выполнении наблюдений методом заряда и ЕП. К участкам развития коррозии на обследуемом трубопроводе относятся только такие, где пространственно уверенно коррелируются зоны нарушения изоляционного слоя, установленные по материалам метода заряда, с аномальными зонами, зафиксированными методом ЕП.

Совместная интерпретация материалов коррозионного обследования позволяет разделить выявленные участки развития коррозии по характеру зафиксированных коррозионных процессов на следующие категории:

- категория J_0 – отсутствие коррозии, пылевидная и равномерная коррозия до 1 мм;
- категория J_1 – язвенная и пленочная коррозия средней интенсивности;
- категория J_2 – язвенная коррозия высокой интенсивности.

Преимуществом метода является минимальный объем подготовительных работ: например, не требуется разработка точной схемы участка с геометрической или геодезической привязкой основных узлов сети. Достаточно лишь точное определение линейных размеров (протяженности) с помощью простейшего механического измерительного оборудования и рабочей документации при ее наличии. Обработка результатов также не требует утомительного нанесения выявленных зон коррозии на чертеж, т. к. для вынесения заключения о степени поражения и дальнейших рекомендаций требуется лишь выполнение простейших алгебраических операций.

Для указания точного местоположения зафиксированных зон развития наружной коррозии на обследованных трубопроводах тепловой сети предлагается следующая последовательность шагов:

- 1) определение протяженности участка;
- 2) выбор способа наблюдения: гальваническая приемная линия, электрический диполь, емкостные электроды;
- 3) подготовка точек подключения (снятие защитных покрытий и теплоизоляции, очистка и обезжиривание);
- 4) создание искусственного электромагнитного поля подземного трубопровода путем подключения к нему источника электрического тока (постоянного или переменного). Один из полюсов источника тока подключают непосредственно к трубе, а второй – к заземлению на таком расстоянии, чтобы влиянием поля этого заземления можно было бы пренебречь. В райо-

нах городской застройки последнее условие является неосуществимым в большинстве случаев и приходится это заземление располагать так, чтобы его влияние было бы минимально.

- 5) измерение магнитных составляющих поля трубы, наблюдаемых над трубопроводом, или значений величины градиента электрической составляющей поля (значительно сложнее). Такие измерения возможны посредством приборов типа ИЭСП, измерителей переменных магнитных и/или электрических полей: ВЕ-метр, СТ-01, ПЗ-33, ИЭП-05, ИМП-05, ПЗ-1 и др.;
- 6) расчет эффективных параметров β и A при помощи формул (4), (5);
- 7) интерпретация рассчитанных значений. В частности, чем выше проводимость изоляции на участке трубопровода, тем большее значение имеет на этом участке параметр β ;
- 8) измерение разности потенциалов между одним из заземлений измерительной установки, потенциал которой условно приравнен к нулю, и всеми остальными точками заземления над исследуемым объектом путем использования мультиметра. Следует отметить, что при наблюдениях методом ЕП фиксируется суммарное электрическое поле, обусловленное как работой коррозионных элементов, имеющих на обследуемом трубопроводе, так и литологической и гидрологической обстановкой на трассе, наличием анодов собственных и сопутствующих станций ЭХЗ и т. п. При нахождении в непосредственной близости от трассы (1–2 м) других корродирующих металлических коммуникаций могут быть зафиксированы и поля, созданные в результате этих процессов [19];
- 9) представление результатов измерений вдоль обследуемой трассы методом ЕП в виде графика потенциала. Из опыта выполненных наблюдений следует, что участки максимального коррозионного износа, как правило, приурочены к достаточно протяженным катодным зонам, в пределах которых имеются ярко выраженные локальные аноды;
- 10) наложение результатов наблюдений методом заряда и ЕП;
- 11) указание отметки начала выявленных на этом участке коррозионных зон (в метрах от начальной точки участка, за которую принимается середина ТК или стенка здания, что связано с ярко выраженной неравномерностью явления [20]);
- 12) определение протяженности выявленных коррозионных зон (в метрах) с разбивкой по степени интенсивности коррозионных процессов на категории J_1 и J_2 . Участки, на которых по результатам выполненных работ на момент обследования зафиксированы коррозионные процессы низкой интенсивности (категория J_0) или отсутствие коррозии, в таблице не указываются;
- 13) приведение для каждого интервала тепловой сети суммарной протяженности зон коррозии (в метрах);

14) расчет коэффициента коррозионного поражения участка:

$$K = L_{\text{корр}} / L_{\text{уч}},$$

где $L_{\text{корр}}$ – суммарная протяженность зафиксированных зон развития коррозии (м); $L_{\text{уч}}$ – протяженность этого участка (м);

15) определение качественной оценки степени поражения участка коррозией, в зависимости от суммарной протяженности зафиксированных коррозионных зон различной интенсивности. Принята следующая качественная градация для оценки степени поражения участка теплопровода наружной коррозией:

- $K=0...0,09$ – «Н» (низкая);
- $K=0,1...0,29$ – «С» (средняя);
- $K=0,30...0,49$ – «П» (повышенная);
- $K \geq 0,5$ – «В» (высокая).

Результаты работы по оценке степени поражения коррозией участков тепловых сетей представляются в виде таблиц. Таблицы составляются отдельно для каждого из обследованных участков тепловых сетей.

Дополнительно приводится информация о величине электродного потенциала труб, измеренного в доступных тепловых камерах или подвалах зданий.

По каждому обследованному участку выделяются наиболее опасные в коррозионном отношении участки и даются рекомендации по местоположению шурфов для оценки остаточной толщины стенки труб.

Результаты

Для подтверждения работоспособности алгоритма был обследован подающий трубопровод на участке тепловой сети от тепловой камеры П-3-ТК-18/1 до тепловой камеры П-3-ТК-18 по улице Серова (г. Омск).

На обследованном подающем теплопроводе зафиксировано 14 локальных зон развития коррозии различной протяженности и интенсивности, которые пространственно группируются на 9 участках трубопровода (табл. 1).

Наиболее протяженный участок развития коррозии зафиксирован в интервале 24–34 м, он объединяет 5 локальных коррозионных зон различной интенсивности, из которых 2 зоны отнесены к категории J_2 , а 3 зоны – к категории J_1 .

Следующим по протяженности является участок 66–72 м, он объединяет 3 локальные коррозионные зоны, из которых 2 зоны отнесены к категории J_2 , а одна – к категории J_1 .

Также следует выделить локальную (не более 2 м) зону развития коррозии категории J_2 в интервале 92–92 м. Остальные зафиксированные зоны коррозии классифицируются как J_1 .

Суммарная протяженность зафиксированных зон развития коррозии составляет 33 м. Степень коррозионного поражения обследованного трубопровода оценивается как «Повышенная» (П).

Таблица 1. Результаты применения новой методики определения степени коррозионного поражения трубопроводов тепловых сетей

Table 1. Results of application of a new approach for determining corrosion damage degree of a pipeline system

Наименование участка Portion name	Протяженность участка $L_{\text{уч}}$, м Length L_{pr} , m	Интервал зоны коррозии Corrosion defect spacing			Суммарная протяженность зон коррозии $L_{\text{корр}}$, м Overall length L_{cor} , m	$K = L_{\text{корр}} / L_{\text{уч}}$	Степень поражения коррозией Corrosion degree
		Интенсивность Intensity					
		J_1	J_2				
ТК-18/1 - ТК-18	1	4	2		33	0,317	П
		24	2				
		26		2			
		28	4				
		32		2			
	2	40	4				
		54	1				
		66		2			
		68	2				
	3	70		2			
		74	2				
		82	2				
		92		2			
		100	4				
Всего	104	14 шт.	23	10			

Для оценки остаточной толщины стенки труб необходимо провести контрольное шурфование теплотрассы в зонах развития коррозии различной интенсивности.

Рекомендуется выполнить шурфование с измерением остаточной толщины стенки труб в следующих контрольных точках (КТ):

- КТ № 1 – в 28 м от ближней стенки П-3-ТК-18/1 в сторону П-3-ТК-18;
- КТ № 2 – в 72 м от ближней стенки П-3-ТК-18/1 в сторону П-3-ТК-18;
- КТ № 3 – в 18 м от ближней стенки П-3-ТК-18 в сторону П-3-ТК-18/1.

В КТ № 1 и КТ № 2 следует ожидать максимальный коррозионный износ труб на обследованном участке, а в КТ № 3 – минимальный коррозионный износ.

Для верификации полученных результатов были произведены замеры толщины стенки трубопровода в шурфе на расстоянии 28 и 72 м от П-3-ТК-18 на подающем и обратном трубопроводе теплотрассы по улице Серова. Результаты, подтвержденные комиссией, состоящей из начальника участка, мастера службы испытаний и измерений и слесаря по контрольно-измерительным приборам и автоматике, приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Результаты замера толщины стенки трубопроводов в шурфе на расстоянии 28 м

Table 2. Results of measuring the pipe wall thicknesses at 28 m inspection point

Подающий трубопровод Supply line					Обратный трубопровод Return line			
ч	3	6	9	12	3	6	9	12
мм	5,0	3,6	5,0	6,8	5,2	3,8	5,3	6,9

Таблица 3. Результаты замера толщины стенки трубопроводов в шурфе на расстоянии 72 м

Table 3. Results of measuring the pipe wall thicknesses at 72 m inspection point

Подающий трубопровод Supply line					Обратный трубопровод Return line			
ч	3	6	9	12	3	6	9	12
мм	4,9	3,4	5,1	6,5	5,0	3,6	5,4	6,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Phetteplace G. et al. District Heating Guide. – Atlanta, ASHRAE, 2013. – 374 p.
- Авдолимов Е.М., Шальнов А.П. Водяные тепловые сети. – М.: Стройиздат, 1984. – 288 с.
- Чичерин С.В. Канальная прокладка трубопроводов тепловых сетей как средство обеспечения надежности систем централизованного теплоснабжения / Материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. – Казань, 13–15 сентября 2016. – Казань: КазНЦ РАН, 2016. – С. 393.
- Jackson J.D. Classical electrodynamics. – New York: Wiley, 1999. – 745 p.
- Alamilla J.L., Espinosa-Medina M.A., Sosa E. Modelling steel corrosion damage in soil environment // Corrosion Science. – 2009. – V. 51. – № 11. – P. 2628–2638.
- Глухов С.В., Коваленко А.В., Чичерин С.В. Развитие систем теплоснабжения структурных подразделений ОАО «РЖД» // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – № 3. – С. 183–188.
- Husock B. Use of pipe-to-soil potential in analyzing underground corrosion problems // Corrosion. – 1961. – V. 17. – № 8. – С. 391–395.
- Klocke F. et al. Potentials of the Phase Field Approach for Modeling Modifications in Material Microstructure during Electrical Discharge Machining // Procedia CIRP. – 2016. – V. 42. – P. 703–708.
- Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б. Управление процессом осаждения конденсируемой фазы с использованием электрического поля // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 28–37.
- Cheng W. Compact 2.4-GHz filtering monopole antenna based on modified SRR-inspired high-frequency-selective filter // Optik-International Journal for Light and Electron Optics. – 2016. – V. 127. – № 22. – P. 10653–10658.
- Maity N., Barik S.P., Chaudhuri P.K. Reflection of plane waves in elastic half space with void pores under the action of uniform magnetic field // International Journal of Engineering Science. – 2013. – V. 71. – P. 62–73.
- Berge A., Hagentoft C.E., Adl-Zarrabi B. Field measurements on a district heating pipe with vacuum insulation panels // Renewable Energy. – 2016. – V. 87. – P. 1130–1138.
- Method and apparatus for impedance measurement in a multi-channel electro-surgical generator: pat. 6293941 USA, 2001.
- Li M.C. et al. A new probe for the investigation of soil corrosivity // Corrosion. – 2001. – V. 57. – № 10. – P. 913–917.
- Benmoussat A., Hadjel M. Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil environment // J. Corros. Sci. Eng. – 2005. – V. 7. – P. 14–36.
- Титов Г.И., Новопашина Н.А. Исследование надежности тепловых сетей // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 2. – P. 30–33.
- Tee K.F., Khan L.R., Li H. Application of subset simulation in reliability estimation of underground pipelines // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – V. 130. – P. 125–131.
- Ranjan G., Rao A.S.R. Basic and applied soil mechanics. – New Delhi: New Age International, 2007. – 774 p.
- Daneti M. A model based approach for pipeline monitoring and leak locating // 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. – Melecon, 26–28 April 2010. – P. 624–629.
- Глухов С.В., Чичерин С.В. Причины развития коррозионных процессов на магистральных тепловых сетях г. Омска // Инструменты и механизмы современного инновационного развития: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Изд-во «Аэтерна», 2016. – С. 11–15.

Поступила 24.11.2016 г.

Информация об авторах

Чичерин С.В., аспирант кафедры теплоэнергетики Омского государственного университета путей сообщения.

UDC 697.34

NEW APPROACH TO DETERMINATION OF CORROSION DAMAGE DEGREE OF PIPELINE SYSTEM ELEMENTS

Stanislav V. Chicherin,
man_csv@hotmail.com

Omsk State Transport University,
35, Marx avenue, Omsk, 644046, Russia.

The relevance and the main aim of the study. The pipeline systems are widely used for supporting the consumers with different kinds of resources. They play the important role in transporting energy materials. The task of reducing the risks of emergency occurrence and decreasing the failures of elements and sections of pipeline systems by early recognition and repair of a defect is very important. The developed technique for determining the location of occurrence of external corrosion sections was tested in relation to the most widespread and split type of pipeline system – heating system, where hydraulic resources transfer over long distances and distribute energy to large areas independently of type of transport medium (such as chilled water, hot water or steam).

The methods used in the study. A new approach for determining failure state, based on deterministic models and parameters was used. If this approach is followed it would lead to a deterministic value of failure pressure. However, it is possible to extend this approach into a probabilistic reliability analysis.

The results. In order to demonstrate the applicability and usefulness of the above methodology, a typical pipeline with a known corrosion defect was analyzed. This reflects the situation where defects and their characteristics become known through periodic inspections. It must be remembered here that the main purpose of this analysis is to illustrate the method. In the absence of any real example, selection of the numerical values and distribution types of the basic variables of this example pipeline were based on the available relevant information. However, the chosen values are considered to be fairly realistic.

Key words:

District heating, electrochemical, thermal insulation, defect, remaining life, inspection.

REFERENCES

1. Phetteplace G. *District Heating Guide*. Atlanta, ASHRAE, 2013. 374 p.
2. Avdolimov E.M., Shalnov A.P. *Vodyanye teplovye seti* [Hot-water distribution systems]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 288 p.
3. Chicherin S.V. Kanal'naya prokladka truboprovodov teplovykh setey kak sredstvo obespecheniya nadezhnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Piping placed in channels as a factor in insuring system reliability]. *Materialy dokladov X shkoly-seminara molodyh uchenykh i specialistov akademika RAN V.E. Alemasova* [Proc. of the X seminar of young scientists and specialists of V.E. Alemasov academy of the RAS]. Kazan, 2016. pp. 393.
4. Jackson J.D. *Classical electrodynamics*. New York, Wiley, 1999. 745 p.
5. Alamilla J.L., Espinosa-Medina M.A., Sosa E. Modelling steel corrosion damage in soil environment. *Corrosion Science*, 2009, vol. 51, no. 11, pp. 2628–2638.
6. Glukhov S.V., Kovalenko A.V., Chicherin S.V. Development of heat supply systems for structural subdivisions of JSC «Russian Railways». *Vestnik VNIIZhT – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2016, vol. 75, no. 3, pp. 183–188. In Rus.
7. Husock B. Use of pipe-to-soil potential in analyzing underground corrosion problems. *Corrosion*, 1961, vol. 17, no. 8, pp. 391–395.
8. Klocke F. Potentials of the Phase Field Approach for Modeling Modifications in Material Microstructure during Electrical Discharge Machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 703–708.
9. Stepkina M., Kudryashova O. Control of condensed phase sedimentation using the electric field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 28–37. In Rus.
10. Cheng W. Compact 2.4-GHz filtering monopole antenna based on modified SRR-inspired high-frequency-selective filter. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, vol. 127, no. 22, pp. 10653–10658.
11. Maity N., Barik S.P., Chaudhuri P.K. Reflection of plane waves in elastic half space with void pores under the action of uniform magnetic field. *International Journal of Engineering Science*, 2013, vol. 71, pp. 62–73.
12. Berge A., Hagentoft C.E., Adl-Zarrabi B. Field measurements on a district heating pipe with vacuum insulation panels. *Renewable Energy*, 2016, vol. 87, pp. 1130–1138.
13. Bruno S., Koenig F.R. *Method and apparatus for impedance measurement in a multi-channel electro-surgical generator*. U.S. Patent no. 6293941, 2001.
14. Li M.C. A new probe for the investigation of soil corrosivity. *Corrosion*, 2001, vol. 57, no. 10, pp. 913–917.
15. Benmoussat A., Hadjel M. Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil environment. *J. Corros. Sci. Eng.*, 2005, vol. 7, pp. 14–36.
16. Titov G.I., Novopashina N.A. Issledovanie nadezhnosti teplovykh setey [Hot-water pipes reliability research]. *Regional'naya arkhitektura i stroitelstvo*, 2011, no. 2, pp. 30–33.
17. Tee K.F., Khan L.R., Li H. Application of subset simulation in reliability estimation of underground pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, vol. 130, pp. 125–131.
18. Ranjan G., Rao A.S.R. *Basic and applied soil mechanics*. New Delhi, New Age International, 2007. 774 p.
19. Daneti M. A model based approach for pipeline monitoring and leak locating. *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Melecon*, 26–28 April 2010. pp. 624–629.
20. Glukhov S.V., Chicherin S.V. Prichiny razvitiya korrozionnykh protsessov na magistralnykh teplovykh setyakh g. Omska [The reasons for corrosion development of Omsk heat transmission systems]. *Instrumenty i mekhanizmy sovremennogo innovatsionnogo razvitiya. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Instruments and mechanisms of modern innovative development. International scientific and practical conference]. Ufa, 2016. pp. 11–15.

Received: 24 November 2016.

Information about the authors

Stanislav V. Chicherin, postgraduate student, Omsk State Transport University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa 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 29.12.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,49. Уч.-изд. л. 12,20.
Заказ 07-17. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ