

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



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Инжиниринг георесурсов

Том 326, № 6, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
Инжиниринг георесурсов**

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 1684-8519

BULLETIN

OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Geo Assets Engineering

Volume 326, № 6, 2015

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2015

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|--|--|--|
| <p>Охрана природной геологической среды
утилизацией хвостов обогащения руд
Голик В.И., Разоренов Ю.И., Масленников С.А.</p> <p>Магнитное поле и природа аномалий на сульфидных
кварцево-жильных месторождениях золота
(на примере Дарасуна, В. Забайкалье)
Ерофеев Л.Я., Ерофеева Г.В.</p> <p>Управление рисками физической безопасности линейной
части магистрального нефтепровода
Кукало И.А., Гривцов С.Н.</p> <p>Метод дифференциации вершин графа
и решение проблемы изоморфизма
Погребной Ан.В., Погребной В.К.</p> <p>Состав «связанных» соединений в маслах
биодegradированных нефтей по результатам
их «on-line» флэш-пиролиза
Антипенко В.Р., Баканова О.С.,
Меленевский В.Н., Ельчанинова Е.А.</p> <p>Влияние добавки оксида магния на состав продуктов
сгорания нанопорошка алюминия в воздухе
Ильин А.П., Рот Л.О., Кривошеина В.В.</p> <p>Свойства полимерных композитов
на основе поливинилового спирта
с наполнителем – наночастицами меди
Труфакина Л.М., Петренко Т.В., Рябова Н.В.</p> <p>Моделирование процесса абсорбции аммиака и
метиламинов водой на новой регулярной насадке
Андреев М.В., Скачков И.В.,
Бальчугов А.В., Коробочкин В.В.</p> <p>Особенности кавитационного обтекания
уменьшенной модели направляющих лопаток
радиально-осевой турбины
Тимошевский М.В., Чуркин С.А., Кравцова А.Ю.,
Первунин К.С., Семёнов Г.А., Маркович Д.М., Ханъялич К.</p> <p>Экспериментальные исследования дизель-генераторной
установки на переменной частоте вращения
Обухов С.Г., Плотников И.А.</p> <p>Определение момента инерции электропривода по
кривой разгона методом Симою
Стельмашук С.В.</p> <p>К вопросу определения источника гармоник на примере
упрощенной модели системы электроснабжения
Волошко А.В., Филянин Д.В.</p> <p>Управление продольными колебаниями мехатронной
системы при помощи емкостного параметра
Томилин А.К., Прокопенко Е.В.</p> <p>Метод решения однопараметрических линейных
матричных уравнений, основанный на
дифференциальных преобразованиях
Симонян С.О., Паповян Р.А.</p> <p>Распределение температуры
в прямом ребре трапециевидного профиля
при лучистом отводе тепла от его поверхности
Видин Ю.В., Казаков Р.В.</p> | <p>6</p> <p>16</p> <p>23</p> <p>34</p> <p>46</p> <p>56</p> <p>62</p> <p>69</p> <p>79</p> <p>95</p> <p>103</p> <p>114</p> <p>122</p> <p>128</p> <p>136</p> | <p>Protection of natural geological environment
by utilizing ore tailings
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A.</p> <p>Magnetic field and the nature of the anomalies
on the sulfide quartz-vein gold deposits
(by the example of Darasun, Eastern Trans-Baikal)
Erofeev L.Ya., Erofeeva G.V.</p> <p>Risk management of physical safety
of the main oil pipeline linear part
Kukalo I.A., Gritvov S.N.</p> <p>Method of graph vertices differentiation
and solution of the isomorphism problem
Pogrebnoy An.V., Pogrebnoy V.K.</p> <p>«Bonded» compounds composition
in the oils of biodegradated petroleum
using their «on-line» flash pyrolysis
Antipenko V.R., Bakanova O.S.,
Melenevskiy V.N., Elchaninova E.A.</p> <p>The influence of magnesium oxide addition on the content
of combustion products of aluminum nanopowder in air
Ilyin A.P., Root L.O., Krivosheina V.V.</p> <p>Properties of polymer composites
on the basis polyvinyl alcohol
with nanoparticles of copper
Trufakina L.M., Petrenko T.V., Ryabova N.V.</p> <p>Modeling of ammonia and methylamine absorption
with water on a new regular packing
Andreenko M.V., Skachkov I.V.,
Balchugov A.V., Korobochkin V.V.</p> <p>Features of cavitation flow around
a scaled-down model of guide vanes
of a Francis turbine
Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Yu.,
Pervunin K.S., Semenov G.A., Markovich D.M., Hanjalić K.</p> <p>The experimental researches of diesel
generator set on variable speed
Obukhov S.G., Plotnikov I.A.</p> <p>Identification of electric drive inertia moment
on the reaction curve by Simoyu method
Stelmashchuk S.V.</p> <p>On the issue of distortion source identification on
the example of a simplified model of electric power system
Voloshko A.V., Filyanin D.V.</p> <p>Control of mechatronic system longitudinal
vibrations using capacitive parameter
Tomilin A.K., Prokopenko E.V.</p> <p>Method for solving one-parameter
linear equations based
on differential transformations
Simonyan S.H., Papovyan R.A.</p> <p>Temperature distribution
in a straight trapezoidal rib with radiant heat removal
from the surface
Vidin Yu.V., Kazakov R.V.</p> |
|--|--|--|

УДК 504.55.054:622(470.6)

ОХРАНА ПРИРОДНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ УТИЛИЗАЦИЕЙ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

Голик Владимир Иванович,

д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии разработки месторождений Северо-Кавказского государственного технологического университета, Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович,

д-р техн. наук, проф., ректор Северо-Кавказского государственного технологического университета, Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: yiri1963@mail.ru

Масленников Станислав Александрович,

канд. техн. наук, доцент, зав. каф. строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства, Россия, 346500, г. Шахты, пр. Ленина, 1. E-mail: MaslennikovSA@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью предотвращения деградации природной геологической среды в районе горных работ путем безотходной утилизации накопленных эксплуатацией месторождений техногенных отходов добычи и переработки полезных ископаемых.

Цель работы: доказательство возможности и целесообразности безотходного извлечения металлов и солей из хвостов переработки руд до уровня норм санитарной безопасности новыми методами, например методом механохимической активации.

Методы исследования: лабораторные исследования в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11 по комплексной программе и методике, включающей: исследование хвостов, выщелачивание металлов реагентами в перколяторах, комбинированное выщелачивание металлов реагентами в дезинтеграторе; интерпретация результатов опытов в форме логарифмической или полиномиальной интерполяции и математическое описание; моделирование параметров механохимической активации; статистическая обработка данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа с реализацией алгоритмов в программной среде MATLAB.

Результаты. Выявлены новые закономерности извлечения металлов из хвостов переработки руд цветной и черной металлургии и углеобогащения в зависимости от переменных параметров процесса переработки. Доказано, что метод механохимической активации позволяет извлекать металлы из хвостов до безопасного уровня, что позволит предотвратить катастрофическую деградацию природных геологических ландшафтов. Предложена эколого-экономико-математическая модель для оценки рекомендуемой технологии извлечения металлов из хвостов переработки руд с расчетом эколого-экономического эффекта вариантов вовлечения некондиционного минерального сырья в производство.

Выводы. Степень деградации природных геологических ландшафтов понижается путем радикальной утилизации хранящихся на земной поверхности хвостов добычи и переработки руд. Извлечение металлов из хвостов добычи и переработки руд до безопасного уровня обеспечивается переработкой методом механохимической активации. Безотходная утилизация хвостов добычи и переработки руд обеспечивает экономический эффект за счет вовлечения в производство некондиционного минерального сырья для получения товарной продукции.

Ключевые слова:

Геологический ландшафт, разработка, месторождение, обогащение, хвосты, металлы, утилизация, экономика, экология, доход, технология, механохимия.

Введение

Влияние продуктов горного производства на геологические ландшафты Земли осуществляется отторжением площадей земли, пылевым и газовым загрязнением экосфер Земли, снижением биологической продуктивности культур, деградацией флоры и фауны и др. способами. В качестве агентов наиболее опасны тяжелые металлы, продуцирующие токсичные компоненты.

Методы предотвращения негативного воздействия горного производства на окружающую среду недостаточно эффективны и не компенсируют причиняемый ущерб. Мероприятия типа биологической рекультивации опасны, так как интенсифицирует производство химически опасных мобильных продуктов [1].

Варианты обращения с хвостами переработки минерального сырья включают в себя:

- хранение с использованием мер защиты окружающей среды;
- переработка с частичным уменьшением опасности.

Условие эколого-экономической эффективности переработки хвостов:

$$P_y > Y_c + Z_n,$$

где P_y – прибыль при утилизации хвостов; Y_c – штрафы за нанесение ущерба окружающей среде в денежном выражении; Z_n – затраты на переработку хвостов.

Утилизация хвостов считается нерентабельной, потому что большая доля ущерба окружающей среде в виде оплаты потери трудоспособности,

рекреационных мероприятий и т. п. перекладывается на общество, в том числе людей, не имеющих отношения к горному производству. Заражение земли продуктами природного выщелачивания хвостов снижает качество земли и показатели соседствующего сельскохозяйственного производства.

Учитывая срок существования хвостохранилищ – столетия, ущерб от хранения хвостов нередко превосходит ценность добытого продукта. Продукты утилизации хвостов обогащения: промышленные продукты, концентраты, кварцевый флюс, становятся сырьем для производства товарных продуктов: силикатные кристаллические изделия, кислотоупорные, износостойкие и химически стойкие продукты, плиты, термостойкие и декоративные материалы и др.

Наибольшую проблему современного горного предприятия составляет негативное изменение природных геологических ландшафтов в процессе образования зон влияния горных работ, в том числе [2]:

- зона локализации полезных ископаемых;
- промежуточная зона, в которой концентрация полезных ископаемых мала;
- зона обитания, в пределах которой сосредоточено живое вещество.

Зона локализации чаще всего представляет собой обводненный комплекс ограниченной мощности, расположенный между водоупорными слоями. Биологические объекты в этой зоне представлены только микроорганизмами.

Промежуточная зона состоит из чередующихся горизонтов разного состава и мощности, среди которых возможны и водоносные. Мощность ее обычно – сотни метров. Как и в зоне локализации, биологические объекты отсутствуют.

Зона обитания включает геологическую среду: материнские породы и почвы, породы зоны аэрации и грунтовых вод, грунтовые и поверхностные воды, часть атмосферы, а также растительный и животный мир.

Разрабатываемое месторождение полезных ископаемых объективно является источником загрязнения окружающей среды. Большую потенциальную угрозу для окружающей среды представляют месторождения металлов, обычно многоэлементные, содержащие набор компонентов, нормируемых в объектах среды обитания человека. Эти компоненты извлекаются не полностью и не все, а хранятся, отравляя окружающую среду химическими агентами (рис. 1).

С начала отработки месторождения сосредоточенные в нем компоненты активизируются и становятся мобильными. Добываемый полезный компонент и сопутствующие ему вещества из зоны активации извлекаются на поверхность, поступают в зону обитания и оказывают на нее воздействие: рудничные воды, горная масса, газы, химические вещества.

С этого времени зона обитания превращается в зону воздействия. В зону воздействия входят воздух,

поверхностные воды и их донные осадки, грунтовые воды, растительный и животный мир, почвенный покров, горные породы зоны аэрации и грунтовых вод, приповерхностная часть атмосферы.

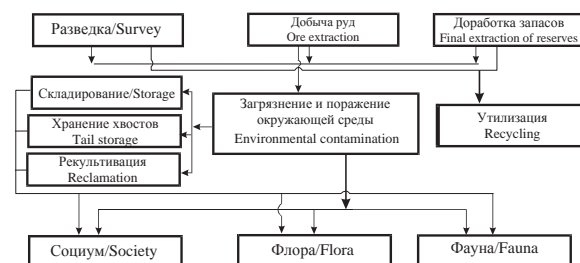


Рис. 1. Влияние горного производства на окружающую среду

Fig. 1. Influence of mining operations on the environment

Промежуточная зона играет роль изоляции. При добыче полезных ископаемых зона изоляции пересекается горными выработками и способствует воздействию процессов добычи на зону обитания.

Извлеченная на поверхность горная масса складировается в отвалах, преобразующих геологический ландшафт с живым веществом (рис. 2).

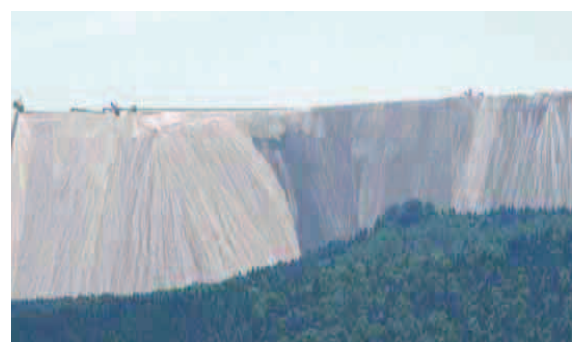


Рис. 2. Хвостохранилище в зеленом массиве

Fig. 2. Tailing storage facility in woodland

Под воздействием атмосферных и космических факторов отвалы разрушаются, химически преобразуются, подвергаются водному и ветровому разносу. С 1 га отвалов ежегодно сносится от 200 до 500 т горной массы.

Добытая руда транспортируется на перерабатывающее предприятие, где подвергается воздействию атмосферных и космических факторов. На перерабатывающем предприятии руда подвергается воздействию химических реагентов. Хвостохранилища становятся зонами инфильтрации жидкой минеральной фазы в подстилающие породы и грунтовые воды и источниками пыли.

Объекты и методы исследования

Горные технологии являются инструментом воздействия, сила которого превышает природные геологические процессы, поэтому снижение уровня их опасности является приоритетным направлением инженерной мысли современности. При

прогнозировании последствий разработки месторождений оценивается не только разрушительное воздействие горного дела на хозяйственные объекты, но и глобальное влияние технологий на геологические процессы.

К числу глобальных явлений относится рост объемов продуктов взрывных процессов горного производства. Перераспределение напряжений в земной коре создает условия для образования водных и газовых потоков. Газовые выбросы влияют на радиационный баланс, образуют туманы, облака, ливневые дожди, провоцируют выпадение катастрофических дождей.

Хрестоматийным примером воздействия древнейших горных технологий на окружающую среду является история Синайского полуострова, где деятельностью древних горняков были изведены леса, что повлекло за собой наблюдаемое в новейшее время опустынивание региона.

Природные явления усиливаются техногенным вмешательством при строительстве и эксплуатации горных объектов. На участках, ослабленных горными работами, дождевые осадки наносят ущерб почвенному покрову, вызывая водную эрозию, снижают плодородие почвы, приводят к ее деградации и смыву. Особенно большой вред ливни наносят там, где осадки не успевают впитываться в почву и стекают по поверхности почвы. Отрицательное воздействие ливней усиливается при растворении атмосферной водой техногенных газовых составляющих воздуха [3].

Катастрофические ситуации оказывают воздействие на Человека, воздушную среду, воду, почву, флору и фауну суши и водоемов в виде химического, радиационного и биологического загрязнений, пожаров, землетрясений и др. катастрофических явлений.

Основными факторами техногенного влияния на геологические ландшафты являются [4]:

- геоморфологические (преобразование поверхности Земли горными работами);
- гидрогеологические (изменение условий питания водоносных горизонтов);
- геохимические (рассеяние химических элементов);
- геотермические (изменение структуры водно-теплового баланса);
- инженерно-геологические (оползни, карсты, просадки, сели и т. п.);
- минералогические (нарушение геодинамического баланса земных недр);
- геофизические (нарушение структуры магнитного и электрического полей Земли, генерация блуждающих токов, сейсмических и звуковых волн).

В новейшее время эволюция технологий недропользования развивается только в направлении изъятия у недр ресурсов без компенсации ущерба. В горнопромышленных регионах наибольшую опасность представляют геохимические и гидрогеологические изменения в местах накопления от-

ходов горнодобывающего и горно-перерабатывающего производства.

Добыча полезных ископаемых ведет к формированию техногенного рельефа, появляются новые отрицательные формы рельефа, активизируются процессы рельефообразования (рис. 3).



Рис. 3. Изменение природного ландшафта под влиянием хвостохранилища: 1 – рыхлые отложения стоков; 2 – технологический мусор; 3 – угнетение растительности

Fig. 3. Change of natural landscape under the influence of tailing storage facility: 1 – run-off friable deposits; 2 – technological wastes; 3 – flora suppression

Так, крупнейший из железорудных карьеров – Лебединский – достигает глубины 350 м с размахом «крыльев» около 2,5 км. Вокруг карьеров в радиусе 5–10 км образовалось множество балок и оврагов, вместимостью около 4 млрд м³. В Старооскольско-Губкинском районе возникли не только выемки глубиной 250–300 м, но и отвалы высотой до 60 м или «горы» из пород вскрыши и отходов обогатительных фабрик. Площадь прямого нарушения земель карьерами достигает 16 тыс. га. Для Белгородской области это около 0,6 % ее площади, а для Губкинского и Старооскольского районов – 5 % территории [5].

Аспекты изменения геологических ландшафтов открытой разработкой типизированы нами по их характеру (таблица).

Влияние технологий и экосистем окружающей среды проявляется двумя способами. Прямое влияние обусловлено тем, что сырье для технологий представляет собой природные ресурсы. В результате тесных взаимосвязей изъятие из недр этих ресурсов влияет на состояние экосистем земли. Косвенное влияние связано с тем, что без разработки ресурсов невозможно экономическое благополучие региона.

Проблема минимизации катастроф включает в себя направления: разработка концепции защиты экосистем окружающей среды; адаптация технологий с учетом экологических требований, моделирование чрезвычайных ситуаций, мониторинг окружающей среды, расчет ущерба от негативного влияния отходов и др.

Таблица. Типизация нарушений окружающей среды горными работами

Table. Typification of environmental intervention by mining

Типы нарушений Types of disturbance	Причины, вызывающие нарушения природной среды Reasons causing the environmental intervention	Характерные виды нарушений Typical disturbances
Геомеханические Geomechanical	Строительство карьеров, отсыпка отвалов, сооружение насыпей и траншей, деформация поверхности в результате разработки, хранение отходов, воздействие карьерного оборудования Construction of opencasts, stockpile filling, fill and trench construction, surface deformation because of exploration, wastes storage, effect of open-cut equipment	Изменение рельефа местности, геологической структуры массива, грунтов, почвы; механические повреждения и уничтожение почвы; изменение структуры использования поверхности Change of topographic relief, geological structure of the solid, subsoil, soil; mechanical damages and soil destruction; change of structure of surface use
Гидрологические Hydrological	Дренирующее воздействие горных выработок на породный массив; деформация поверхности в связи с дренажом вод; смещение направления водостоков; загрязнение внутренних и внешних вод; откачка подземных вод для различных целей; дренаж месторождений Drainage effect of mining openings on rock mass; surface deformation because of water drainage; drain direction shift; pollution of internal and external waters; pumping-out of ground waters for different purposes; drainage of deposits	Изменение уровня подземных вод и параметров гидрографической сети; ухудшение качества вод; водоносных горизонтов, инженерно-геологических свойств грунтов и водного режима в почве; оседание поверхности; изменение режима подпитки рек Change of ground water level and parameters of drainage network; degradation of quality of underground reservoir waters, engineering-geological features of subsoil and water regime in soil; surface subsidence; change of river makeup mode
Химические Chemical	Эмиссия газов и химически активной пыли; сбросы загрязненных органическими и неорганическими компонентами вод; воздействие токсичных компонентов отвалов Emission of gases and chemically active dust; disposal of waters polluted with organic and non-organic components; effect of toxic components of the dump	Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, подкисление, засоление, загрязнение вод, подкисление, алкализация, засоление, увеличение токсичных элементов почв Change of the structure and the features of the air; water acidification, salinization, contamination; acidification, alkalization, salinization, increase of toxic elements in soil
Физико-механические Physical and mechanical	Эмиссия пыли и аэрозолей из атмосферы и вод, загрязненных суспензией и гидрозолями Emission of dust and aerosol from air and water, polluted with suspension and hydrosols	Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, вод и почвы Change of the structure and properties of the air, water and soil
Термические Thermal	Загрязнение воздуха пылегазовыми компонентами Air contamination with dust and gas components	Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, биохимических процессов в экосистемах и микроклимата Change of the structure and properties of the air, biochemical processes in ecosystems and microclimate

При промышленной эксплуатации месторождений полезных ископаемых на первых этапах существования предприятий выборочно обрабатывают богатые участки, оставляя в недрах некондиционные руды. Так, Коробковское месторождение КМА обрабатывает массив железистых кварцитов, перекрытых мощной толщей обводненных песчано-глинистых пород, этажно-камерной системой разработки в пределах одного выемочного этажа под защитой предохранительной рудной потолочины, опирающейся на междукамерные целики, потери руды в которых составляют 60 %. Поискам инновационных технологий добычи и переработки минерального сырья, способствующих энерго- и ресурсосбережению и обеспечивающих полноту, комплексность извлечения полезных компонентов и экологическую безопасность производства, посвящены работы многих ученых России [6].

В ходе добычи руд запасы обедняются с переводом в категорию неактивных, которые достигают в настоящее время около 50 % запасов большинства месторождений.

Руды перерабатывают на обогатительных фабриках, стоки которых отличаются многообразием состава: пульпа (80–85 %), содержащая до

95–98 % взвесей и коллоидов и сливы сгустителей (3–20 %) [7]. Поведение твердых частиц при отстаивании в сгустителях и хвостохранилищах зависит от размера частиц и состояния их поверхности. Значение процессов отстаивания возрастает при переработке труднообогатимых руд с высоким содержанием шламов. Стоки, представленные флотационными хвостами, сливами сгустителей и фильтратами направляются в хвостохранилища, которые в горных условиях располагаются на берегах водных артерий (рис. 4) [8].

В результате разработки месторождений и первичной переработки руд образуются протяженные ореолы химического загрязнения почв, водотоков и их отложений. Несмотря на снижение объемов горного производства в годы современного промышленного кризиса, минеральное загрязнение не уменьшается, потому что у месторождений установились устойчивые связи с экосистемами окружающей среды и на нейтрализацию нужны годы. Ореолы химического загрязнения формируются за счет растворения твердых частиц поверхностными и подземными водами, сброса шламов обогатительных фабрик и ветрового переноса шлама с пляжей хвостохранилищ.

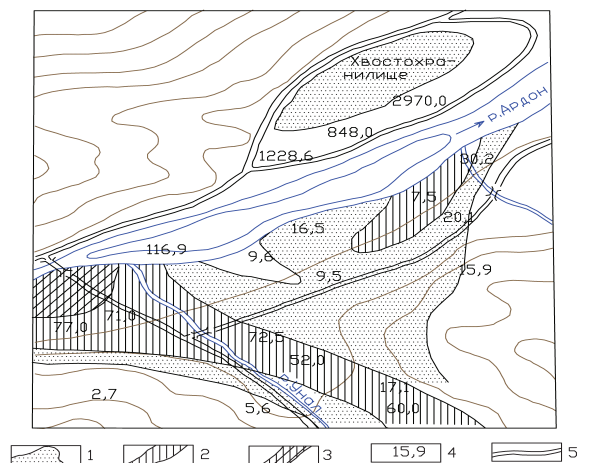


Рис. 4. Расположение Унальского хвостохранилища на берегу реки Ардон. Концентрация металлов (мг/кг): 1) 10–30; 2) 30–100; 3) более 100. 4 – количественный параметр загрязнения; 5 – автодороги

Fig. 4. Unal tailing storage facility on the bank of the river Ardon. Metal concentration (mg/kg): 1) 10–30; 2) 30–100; 3) more than 100. 4 is the quantitative parameter of contamination; 5 are the highways

Так, в Старооскольско-Губкинском районе сформировалась зона аномального запыления почв эллипсовидной формы размером до 40 км по длинной оси. В центральной части зоны выпадает более 4000 кг/га пыли в год. Содержание тяжелых металлов (кобальт, никель, хром, ванадий и др.) превышает природный фон нередко в 100 раз. Под влиянием системы гидро-защиты карьеров нарушен режим подземных вод в радиусе до 40 км по верхнему водоносному горизонту и до 80 км по кристаллическому. Вскрышные и рудовмещающие породы, железные руды и продукты их переработки являются источниками аномально высоких ионизирующих излучений, так как железорудные месторождения КМА являются радиационно-опасными [9].

Металлические месторождения поставляют регионам силикозоопасную кварцевую пыль, радионуклиды и комплекс отравляющих веществ, в результате чего подавляющее количество участков добычи руд правомерно относить к районам геологического бедствия.

Антропогенное воздействие на окружающую среду в горнодобывающих регионах достигло уровня, превышающего восстановительные силы природы. Взаимовлияние уровней загрязнения в атмосфере, гидросфере и литосфере, вследствие увеличения количества и качества загрязнителей позволяет прогнозировать возможность техногенных катастроф.

Сложный многокомпонентный состав хвостов обогащения и металлургии, содержащих вещества первого и второго класса опасности, не позволяет утилизировать их без обезвреживания, а применяемые технологии переработки не позволяют извлекать ценные компоненты при малом их содержании до уровня санитарных требований.

Количество накопленных хвостов измеряется миллионами тонн. В хранилища сбрасываются ценные компоненты: золото, уран и редкоземельные элементы. В хвостохранилища только Михайловского ГОК КМА ежегодно выносятся не менее 1,5 т золота и 2 т урана. Прогнозные ресурсы только золота в текущих отходах четырех ГОК составляют не менее 3 т/год при валовом содержании 0,5–0,6 г/т, а в укрупненных пробах, отобранных из пульпопроводов, содержание золота изменяется в пределах 0,2–9 г/т. Такая ситуация характерна для всех металлических рудников [10].

Работы по глубокой утилизации отходов производства в России и большинстве стран мира пока не выходят за рамки обсуждения проектов. Утилизация металлосодержащих хвостов возможна только при условии извлечения из них металлов до уровня санитарных норм.

В горнодобывающих областях имеются запасы техногенного сырья, инфраструктура и кадры для организации перерабатывающего производства. Но практических мер по утилизации хвостов переработки не предпринимается. В результате расширения запасов хвостохранилищ для нужд населения и использования в теневом бизнесе территория региона систематически усугубляет статус региона с катастрофической загрязненностью химическими продуктами.

Использование металлосодержащих хвостов без извлечения из них металлов иногда преподносится как пример «безотходной технологии производства концентрата с подземным складированием необогащенных хвостов». Экономический ущерб, наносимый утилизацией хвостов без извлечения металлов, очевиден, поскольку суммарная стоимость похороненных ценных полезных элементов может превышать стоимость извлеченных металлов.

В отечественном производстве не работает механизм исполнения Закона Российской Федерации «О недрах», статья 22 которого предусматривает [11]:

- соблюдение требований законодательства, а также утвержденных в установленном порядке стандартов по технологии ведения работ, связанных с использованием недрами, и при первичной переработке минерального сырья;
- соблюдение утвержденных в установленном порядке стандартов, регламентирующих условия охраны недр, атмосферного воздуха, земель, лесов, вод, а также зданий и сооружений от вредного влияния работ, связанных с использованием недрами;
- приведение участков земли и других природных объектов, нарушенных при пользовании недрами, в состояние, пригодное для их дальнейшего использования.

Считается, что ущерб здоровью населения регионов добычи возмещается штрафами, размеры которых несопоставимы по величине с нанесенным вредом при пользовании недрами и к рекреации природы нередко не имеют отношения.

Опыт стран с развитой добывающей отраслью свидетельствует, что законы о недрах нарушаются не везде. Например, в Германии утилизация осуществляется за счет средств, отчисляемых предпринимателем с начала добычи ресурсов в установленном законом порядке. Поэтому утилизация хвостов осуществляется непременно и в срок.

Новая концепция обращения с некондиционным минеральным сырьем исходит из того, что, поскольку оценить действительный ущерб от горного производства невозможно, следует исключить возможность нанесения ущерба: хвосты не хранить, а утилизировать [12].

Из известных способов извлечения металлов выщелачивание металлов считается более перспективным, хотя оно длится долго и не обеспечивает извлечения до фонового уровня [13].

Возможность извлечения металлов до уровня санитарных требований представляет технология с механохимической активацией процессов выщелачивания, которая:

- увеличивает извлечение металлов в 1,5–2 раза;
- по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания обеспечивает равное извлечение во время на два порядка меньше [14].

В ближайшей перспективе основные запасы металлических руд России предстоит добывать подземным способом разработки в большей степени потому, что открытый способ разработки вступил в антагонистические противоречия с вопросами охраны окружающей среды.

Поэтому проблема утилизации хвостов переработки приобретает особую актуальность как радикальное средство предупреждения техногенного перерождения природных геологических ландшафтов.

В хвостохранилищах неуправляемо развиваются физико-химические процессы природного выщелачивания с химическим загрязнением окружающей среды. В камере же дезинтегратора реагенты в замкнутом контуре переводят в раствор большую часть содержащихся в хвостах металлов в течение приемлемого времени.

Механохимическая технология позволяет извлекать из хвостов обогащения металлы до уровня санитарных требований. Экспериментальное обоснование этого осуществлено на хвостах обогащения цветных и черных металлов и углей.

Хвосты выщелачивали в дезинтеграторе в альтернативных режимах (рис. 5):

1. Агитационное выщелачивание необработанных хвостов.
2. Агитационное выщелачивание предварительно активированных хвостов.
3. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.
4. Агитационное выщелачивание активированных в дезинтеграторе хвостов.
5. Многократное выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.

При постановке экспериментов с использованием математического планирования по плану Вен-

кена-Бокса в качестве независимых факторов приняты:

- содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе (X_1) 2–10 г/л;
- содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе (X_2) 20–160 г/л;
- весовое соотношение массы выщелачивающего раствора и выщелачиваемой массы (X_3) в единичном эксперименте (50 г) 4–10 г/л;
- время выщелачивания (X_4) в пределах 0,15–1,0 ч.



Рис. 5. Лабораторный дезинтегратор Дез-11

Fig. 5. Laboratory disintegrator Dez-11

Полиметаллические руды Садонских месторождений (Россия, Северный Кавказ). Химический состав хвостов, %: SiO_2 – 31,4; Fe – 4,4; CaO – 1,96; S – 1,88; Ag – 0,015; Cu – 0,18; Mn – 0,015; K_2O – 3,5; Al_2O_3 – 0,8; TiO_2 – 0,03; Zn – 0,95; Pb – 0,84. Извлечение металлов в раствор при единичном цикле переработки составило: свинец – от 13 до 34 %, цинк – от 10 до 46 %.

Результаты исследования позволяют сделать выводы:

- активация в дезинтеграторе с выщелачиванием вне его увеличивает извлечение: по свинцу – в 1,4 раза, по цинку – в 1,1 раза;
- выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания обеспечивает такое же извлечение на 2 порядка скорее;
- в порядке убывания степени влияния на процесс следуют: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора, число циклов переработки и соотношение Ж: Т.

Железистые кварциты КМА. Химический состав хвостов магнитной сепарации железистых кварцитов, %: SiO_2 – 64, Fe – 8, Al_2O_3 – 5,2, Mn – 3,2, K_2O – 0,7, P – 0,1, Ca – 0,8, MgO – 0,2, Cu – $5 \cdot 10^{-3}$, Ni – $4 \cdot 10^{-3}$, Zn – $5 \cdot 10^{-4}$, As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y – $(30-50) \cdot 10^{-5}$.

При содержании железа в исследуемой пробе 8 % однократным выщелачиванием извлечено примерно 1 % железа, а после трехкратного пропускания хвостов через дезинтегратор в раствор

извлечено 3 % железа. При дальнейшем увеличении циклов переработки достигается безопасное по санитарным требованиям содержание железа во вторичных хвостах.

Кроме эффекта извлечения активация хвостов в дезинтеграторе увеличивает прочность твердеющей смеси с добавкой цемента на величину коэффициента 1,17.

Угли Росийского Донбасса.

Извлечение из растворов выщелачивания хвостов обогащения в выпаренный и прокаленный продукт составило, %: кобальта – 104,5; никеля – 102,1; свинца – 43,5; цинка – 36,6; хрома – 18,0; марганца – 1,4. Извлечение металлов при их очень малом содержании в растворах, мг/л: марганец – 1, никель – 7, кобальт – 2, хром – 4, свинец – 3, цинк – 5.

Эффективность технологии безотходной утилизации определяется соотношением затрат и ущерба от хранения отходов, а область эффективного применения природоохранных технологий – как совокупность значений, отвечающих приемлемому качеству окружающей среды при доступных затратах на ее поддержание (рис. 6).

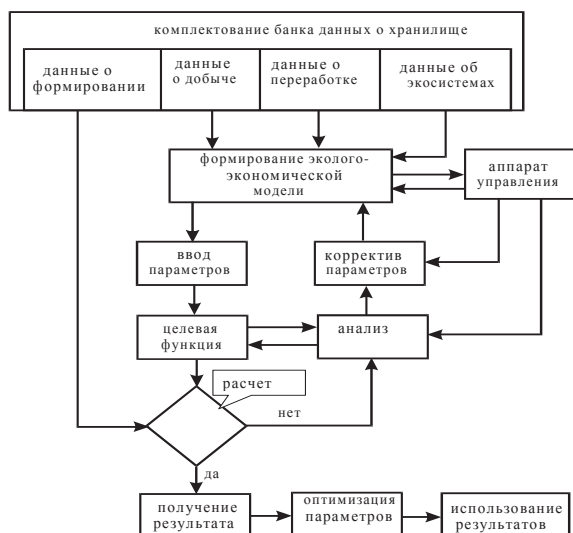


Рис. 6. Схема исследования эффективности утилизации

Fig. 6. Diagram of studying recycling efficiency

Универсальная схема безотходного горнодобывающего производства включает этапы процесса от добычи до использования в виде товара (рис. 7).

Получение экономического эффекта от утилизации хвостов обогащения возможно в случае оптимизации параметров системы «добыча–переработка» [15].

Метод оценки включает в себя этапы:

- анализ сырьевой базы для использования технологии безотходной утилизации;
- оценка возможностей рынка новой попутной продукции;
- анализ качества основной и новой попутной продукции;
- анализ материальных и денежных потоков в процессе производства;

- анализ цен минерального сырья и продуктов его переработки.

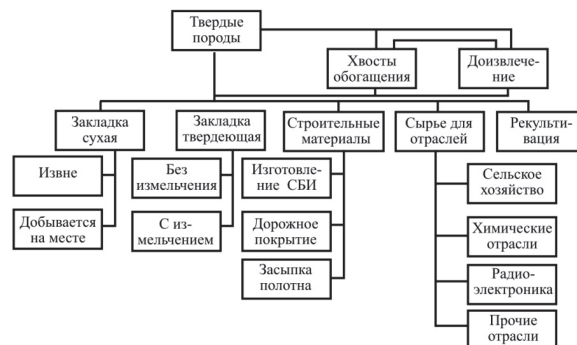


Рис. 7. Схема утилизации хвостов обогащения

Fig. 7. Diagram of mill tailing recycling

Концепт экономической эффективности новой технологии состоит в том, что при сравнимых затратах из уже извлеченного из недр сырья извлекается большее количество металла за счет утилизации некондиционного по содержанию металлов сырья.

Механизм оценки утилизации хвостов обогащения включает в себя:

- прогнозирование роста эффективности производства;
- перевод забалансовых запасов в категорию балансовых;
- координацию деятельности по регулированию технологических процессов;
- оценку, контроль и анализ результатов переработки.

Финансовые результаты – прибыль по итогам деятельности участка переработки Π_p :

$$\Pi_p = \Pi_{mi} - C_{ТП} = \Pi_{mi} - C_o - C_{тр} - C_m,$$

где Π_{mi} – ценность извлеченного металла, р.; $C_{ТП}$ – себестоимость товарной продукции, р.; C_o – себестоимость обогащения, р.; $C_{тр}$ и C_m – затраты на транспортирование до завода и на металлургический передел, р.

Эколого-экономическая модель эффективности утилизации некондиционного минерального сырья по критерию максимум прибыли с учетом экологии региона расположения горного предприятия объединяет экологический и экономический компоненты обращения с некондиционным минеральным сырьем [16]:

$$\begin{aligned} \Pi = & \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{ (M_{ey} \Pi_{my} + Q_y \Pi_{qy}) \} - \\ & - \sum_{z=1}^3 [K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x] - \\ & - [(M_e \Pi_m + Q \Pi_q) + \\ & + Q_r \Pi_r] K_c K_y K_T K_0 K_T K_{вp} K_q \rightarrow \max, \end{aligned}$$

где P – продукты утилизации некондиционного сырья; O – виды некондиционного сырья; П – технологические процессы переработки сырья; T – время переработки некондиционного сырья; F –

фазы существования рудника и фабрики; N – стадия утилизации некондиционного сырья; Z – затраты на переработку некондиционного сырья; K – капитальные вложения для организации участка утилизации некондиционного сырья; K_c – коэффициент самоорганизации отвалов некондиционного сырья, K_y – коэффициент утечки растворов; K_r – коэффициент дальности утечки растворов; K_b – коэффициент влияния ингредиентов на биосферу; K_r – коэффициент риска; K_{bp} – коэффициент учета времени; K_q – коэффициент неучтенных факторов.

Прибыль от извлечения металлов из некондиционного минерального сырья [17]:

$$\Pi_x = \frac{\sum_{n_o} (C_{т.о} - Z_{о.о} - Z_{о.м}) \cdot Q_o}{t_o} + C_{ш}^o + \frac{\sum_{n_m} (C_{т.м} - Z_{о.м} - Z_{м.м}) \cdot Q_m}{t_m} + C_{ш}^m,$$

где Π_x – прибыль от переработки некондиционного сырья, р./т; $C_{т.о}$ – стоимость реализации продукции переработки некондиционного сырья, р./т; $Z_{о.о}$ – затраты на обогатительный передел некондиционного сырья, р./т; $Z_{о.м}$ – затраты на металлургический передел некондиционного сырья, р./т; n_o – количество извлекаемых компонентов из некондиционного сырья; Q_o – масса некондиционного сырья, т; t_o – время переработки сырья, год; $C_{ш}^o$ – штрафы за хранение хвостов обогащения, р./год; $C_{т.м}$ – реализация продуктов переработки хвостов металлургии, р./т; $Z_{о.м}$ – затраты на обогащение хвостов металлургии, р./т; $Z_{м.м}$ – затраты на металлургический передел хвостов металлургии, р./т; n_m – количество извлекаемых из хвостов металлургии компонентов; Q_m – масса хвостов металлургии, т; t_m – время переработки хвостов металлургии, лет; $C_{ш}^m$ – штрафы за хранение хвостов металлургии, р./год.

В условиях некоторых горнодобывающих предприятий безотходная утилизация хвостов обогащения может быть прибыльной даже без производства продукции из утилизируемых хвостов, если при этом уменьшается опасность для окружающей природной среды [18].

Механохимическая активация хвостов в аппаратах, где выщелачивающий раствор запрессовывается в образующиеся трещины, а извлечение металлов происходит одновременно с разрушением кристаллов, обеспечивает извлечение металлов в интервале от 50 до 80 % от исходного содержания в хвостах со снижением остаточного содержания до норм ПДК.

Важной особенностью механохимической технологии является то, что после извлечения металлов хвосты обогащения могут быть использованы в составе твердеющей смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и в качестве вяжущих компонентов, так как увеличение активности компонентов на 20–25 % повышает прочность смеси до 1 Мпа [19].

Инструментом получения прибыли при полной утилизации хвостов обогащения может быть механохимическая переработка по предлагаемой схеме (рис. 8).



Рис. 8. Схема извлечения металлов из хвостов обогащения

Fig. 8. Diagram of metal extraction from mill tailings

В процессе механоактивации извлекаются все содержащиеся в хвостах металлы до уровня санитарных требований, после чего вторичные хвосты становятся пригодными для изготовления товарной продукции без ограничений [20].

Заключение

Накопление хвостов переработки металлических руд формирует глобальную проблему перерождения природных геологических ландшафтов, реальное решение которой заключается только в безотходной утилизации хвостов переработки.

Утилизация хвостов обогащения металлических руд приносит прибыль, величина которой определяется разностью величин предотвращаемого ущерба и затрат на утилизацию. При объективной оценке опасности хранения хвостов обогащения утилизация хвостов может обеспечить народнохозяйственный эффект даже без производства товарной продукции из утилизируемых хвостов.

Вовлечение в производство техногенных запасов хвостов обогащения металлических руд является важным фактором удовлетворения потребностей общества в металлах. Переход многих предприятий на подземную разработку месторождений должен компенсировать уменьшение объемов добычи улучшением качества добываемого сырья за счет использования технологий с закладкой пустот твердеющими смесями, которые могут изготавливаться из хвостов переработки руд.

Извлечение металлов из хвостов обогащения руд обеспечивается использованием технологий с механохимической активацией, что подтверждается сходимостью результатов переработки сырья различных типов.

Вовлечение в производство колоссальных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и заменяет необходимость освоения новых месторождений минерального сырья, что приобретает особую актуальность ввиду дефицита в России ряда металлов для обеспечения ее национальной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов А.Г., Петин А.Н., Дроздова Е.А. Геоморфологические и эколого-экономические аспекты рекультивации отвалов вскрышных пород горнодобывающих предприятий региона КМА // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 67–72.
2. Беланов И.П., Семина И.С., Шпилова А.М. Почвенно-экологическое состояние естественных ландшафтов в районе интенсивной добычи каменного угля // ГИАБ. – 2013. – № 10. – С. 112–116.
3. Легостаева Я.Б., Ксенофонтова М.И., Дягилева А.Г. Эколого-геохимический мониторинг почвенного покрова в зоне воздействия Нюрбинского ГОКа // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С. 79–83.
4. Трубецкой К.Н., Корнилов С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 57–62.
5. Колмыков С.Н., Корнилов И.А. Экологическое состояние водных объектов Старооскольско-Губкинского района как элементов экологического и рекреационного каркаса // Современные проблемы освоения недр: матер. II Междунар. заочной науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Белгород: ИПК НИУ «БелГУ», 2012. – С. 129–132.
6. Амвросов А.Ф. Мониторинг опасных геологических процессов при недропользовании // ГИАБ. – 2014. – № 7. – С. 45–50.
7. Ермолович Е.А. Утилизация отходов обогащения железистых кварцитов в мелкозернистой бетонной смеси для тротуарной плитки // ГИАБ. – 2013. – № 8. – С. 84–87.
8. Фоменко А.А. Использование техногенных скоплений и забалансовых руд цветных металлов в контексте экономики природопользования // Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 89–94.
9. Голик В.И., Полухин О.Н. Природоохранные технологии в горном деле. – Белгород: НИУ БелГУ, 2013. – 281 с.
10. Корнилов И.А., Колмыков С.Н., Петин А.Н. Оценка степени воздействия горнодобывающих предприятий КМА на гидроэкологическую ситуацию Белгородской области // Горный журнал. – 2012. – № 10. – С. 68–72.
11. Гендлер С.Г. Обеспечение комплексной безопасности при освоении минерально-сырьевых и пространственных ресурсов недр // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 98–102.
12. Логачев А.В. К вопросу о геотехнологических вариантах поэтапной разработки месторождений // Цветная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 46–50.
13. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production / O.N. Polukhin, V.I. Komashchenko, V.I. Golik, C. Drebenstedt. – Freiberg, Germany, 2014. – P. 402–413.
14. Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efrementkov A.B. Recycling of ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368. DOI: 10.4028.
15. Ракишев Б.Р. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 68–73.
16. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / В.И. Голик, В.И. Комащенко, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 91–95.
17. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий // Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 79–85.
18. Голик В.И., Полухин О.Н. Концепция извлечения металлов из хвостов переработки железных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – Специальный выпуск. – № ОС4. – № 3. – С. 67–72.
19. Golik V.I., Komashshenko V.I., Drebenstedt K. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 137–142.
20. Golik V.I., Komashshenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources Disintegrators. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 143–148.

Поступила 12.11.2014 г.

UDC 504.55.054:622(470.6)

PROTECTION OF NATURAL GEOLOGICAL ENVIRONMENT BY UTILIZING ORE TAILINGS

Vladimir I. Golik,

North Caucasian State Technological University, 44, Nikolaeva street, Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: vigolik@mail.ru

Yuri I. Razorenov,

North Caucasian State Technological University, 44, Nikolaeva street, Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: yiri1963@mail.ru

Stanislav A. Maslennikov,

Institute of the service sector and entrepreneurship, 1, Lenin Avenue, Shakhty, 346500, Russia. E-mail: MaslennikovSA@mail.ru

The main aim of the research is to study the feasibility and economic viability of waste-free extraction of metals and salts from ore tailings to the standards of sanitary safety by new methods, such as mechanical activation.

Methods: laboratory studies in Disintegrator installing DES 11 by the integrated program and the method including a study of tailings, metal leaching with the reagents in percolators, metals combined leaching with reagents in a disintegrator; interpretation of the test results in the form of a logarithmic or polynomial interpolation and mathematical description; simulation of the parameters of mechanical activation; statistical analysis based on multiple regression and correlation analysis implementing the algorithms in the software environment MATLAB.

Results: The authors have identified new laws of extracting metals from ore tailings of ferrous and nonferrous metallurgy and coal washing, depending on the processing variables. It is proved that the method of mechanical activation allows metal separation from the tailings to the standards of sanitary requirements that will prevent a catastrophic degradation of natural geological landscapes. The authors developed the environmental-economic-mathematical model to assess the recommended technologies for extracting metals from ore tailings with the calculation of ecological and economic effect of the options of involving substandard mineral raw materials in production.

Conclusions. The degradation level of natural geological landscapes is reduced by radical recycling of ore mining and processing tailings stored on the earth surface. Separation of metals from ore tailings to the standards of sanitary requirements is provided by the processing by the mechanical activation method. The waste-free recycling of ore mining and processing tailings provides economic benefits due to engaging the substandard mineral raw materials in the production to obtain the marketable products.

Key words:

Geological landscape, development, field, enrichment, tails, metals, recycling, economy, environment, income, technology, mechanochemistry.

REFERENCES

- Kornilov A.G., Petin A.N., Drozdova E.A. geomorfologicheskie i ekologo-ekonomicheskie aspekty rekultivatsii otvalov vskryshnykh porod gornodobyvayushchikh predpriyatiy regiona KMA [Geomorphological and ecological-economic aspects of remediation of overburden dumps in KMA mining region]. *Mining Journal*, 2014, no. 9, pp. 67–72.
- Belanov I.P., Semina I.S., Shipilova A.M. Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie estestvennykh landshaftov v rayone intensivnoy dobychi kamennogo uglya [Soil and environmental condition of the natural landscape in the area of intensive coal mining]. *GIAB*, 2013, no. 10, pp. 112–116.
- Legostaeva Ya.B., Ksenofontova M.I., Dyagileva A.G. ekologo-geokhimichesky monitoring pochvennogo pokrova v zone vozdeystviya Nyurbinskogo GOKa [Ecological and geochemical monitoring of soil in the affected area Nurba GOK]. *Mining Journal*, 2014, no. 4, pp. 79–83.
- Trubetzkoy K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. O novykh podkhodakh k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya gornogo proizvodstva [On new approaches to sustainable development of mining production]. *Mining Journal*, 2012, no. 1, pp. 57–62.
- Kolmykov S.N., Kornilov I.A. Ekologicheskoe sostoyanie vodnykh obektov Starooskolsko-Gubinskogo rayona kak elementov ekologicheskogo i rekreatsiionnogo karkasa [Ecological status of water bodies in Starooskolsk-Gubinsk district as the elements of ecological and recreational carcass]. *Sovremennye problemy osvoeniya nedr. Materialy II Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Modern problems of development of mineral resources. Proc. II Intern. extramural scientific-practical conf. for young scientists and students]. Belgorod, IPK NIU «BelSU», 2012. pp. 129–132.
- Amvrosov A.F. Monitoring opasnykh geologicheskikh protsessov pri nedropolzovanii [Monitoring of hazardous geological processes in subsoil use]. *GIAB*, 2014, no. 7, pp. 45–50.
- Ermolovich E.A. Utilizatsiya otkhodov obogashcheniya zhelezistykh kvartsitov v melkozernistoy betonnoy smesi dlya trotuarnoy plitki [Disposal of tailings of ferruginous quartzites in fine concrete mixes for paving slabs]. *GIAB*, 2013, no. 8, pp. 84–87.
- Fomenko A. Ispolzovanie tekhnogennykh skoplenny i zabalansovykh rud tsvetnykh metallov v kontekste ekonomiki prirodopolzovaniya [Using technological clusters and balance ores of nonferrous metals in the context of environmental economics]. *Mining Journal*, 2013, no. 2, pp. 89–94.
- Golik V.I., Polukhin O.N. *Prirodookhrannyye tekhnologii v gornom dele* [Environmental protection technologies in mining industry]. Belgorod, NIU Bel GIs, 2013. 281 p.
- Kornilov I.A., Kolmykov S.N., Petin A.N. Otsenka stepeni vozdeystviya gornodobyvayushchikh predpriyatiy KMA na gidroekologicheskuyu situatsiyu Belgorodskoy oblasti [Evaluation of KMA mining enterprises impact on hydroecological situation in Belgorod region]. *Mining Journal*, 2012, no. 10, pp. 68–72.
- Gendler S.G. Obespechenie kompleksnoy bezopasnosti pri osvoenii mineralno-syryevykh i prostranstvennykh resursov nedr [Integrated security when developing mineral resources and spatial subsoil resources]. *Mining Journal*, 2014, no. 5, pp. 98–102.
- Logachev A.V. K voprosu o geotekhnologicheskikh variantakh poetapnoy razrabotki mestorozhdeniy [On the issue of geotechnical options of phased field development]. *Non-ferrous metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 46–50.
- Polukhin O.N., Komashchenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt C. *Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production*. Freiberg, Germany, 2014. pp. 402–413.
- Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efremenkov A.B. Recycling of ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363–368. DOI: 10.4028.
- Rakishev B.R. Kompleksnoe ispolzovanie rudy na predpriyatiyakh tsvetnoy metallurgii Kazakhstana [Integrated use of ores at nonferrous metallurgy enterprises of Kazakhstan]. *Mining Journal*, 2013, no. 7, pp. 68–73.
- Golik V.I., Komashchenko V.I. Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Povyshenie polnoty ispolzovaniya nedr putem glubokoy utilitatsii otkhodov obogashcheniya uglya [Increase of completeness in using subsoil by deep disposal of coal enrichment]. *Mining Journal*, 2012, no. 9, pp. 91–95.
- Golik V.I. Kontseptualnye podkhody k sozdaniyu malo- i bezotkhodnogo gornorudnogo proizvodstva na osnove kombinirovaniya fiziko-tekhnicheskikh i fiziko-khimicheskikh geotekhnologiy [Conceptual approaches to development of low- and non-waste mining production on the basis of a combination of physical, technical, and physical-chemical geotechnologies]. *Mining Journal*, 2013, no. 5, pp. 79–85.
- Golik V.I., Polukhin O.N. Kontseptsiya izvlecheniya metallov iz khvostov pererabotki zheleznykh rud [The concept of metal extraction from tailings of iron ores]. *Mining information-analytical bulletin*, 2013, Special Edition, no. OC4, no. 3, pp. 67–72.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Drebenstedt K. *Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators*. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 137–142.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Rasorenov Y.I. *Activation of Technogenic Resources Disintegrators*. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 143–148.

Received: 12 November 2014.

УДК 550. 83: 550. 814: 553: 41

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПРИРОДА АНОМАЛИЙ НА СУЛЬФИДНЫХ КВАРЦЕВО-ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА (НА ПРИМЕРЕ ДАРАСУНА, В. ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Ерофеев Леонид Яковлевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. геофизики
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: Erofeev_Leonid@tpu.ru

Ерофеева Галина Васильевна,

д-р пед. наук, профессор кафедры общей физики Физико-технического
института Национального исследовательского Томского политехнического
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: egy@mail.ru

Актуальность работы определяется необходимостью исследования природных физических полей и их связей с геологической средой.

Цель работы: изучить магнитное поле и природу его изменений на типичном для Сибири сульфидном кварцево-жильном месторождении золота Дарасун, для определения возможностей магнитометрии при решении различных поисково-разведочных задач на стадиях от разведки до эксплуатации такого типа месторождений, в конечном итоге – для повышения эффективности геологоразведочных работ на золото за счет использования в общем комплексе их весьма дешёвого и мобильного метода – магниторазведки.

Методы исследования: специализированные опытно-методические полевые магнитные съемки различной точности наблюдений и детальности сети измерений, лабораторные определения магнитной восприимчивости целенаправленно отобранных образцов горных пород и руд, статистический анализ полученных данных, сопоставление их с известными элементами геологического строения рудоносной площади и ее окрестностей, а также с данными эксплуатации месторождения.

Результаты. Получена площадная картина изменений приращений магнитной индукции в пределах непосредственно рудного поля месторождения Дарасун и его ближайших окрестностей, определен спектральный состав ее изменений, изучена магнитная восприимчивость горных пород рудного поля и его окрестностей, соотношение их магнитной индукции в современном магнитном поле Земли с остаточным намагничением; дана оценка анизотропии магнитного поля и установлены связи магнитного поля с различными элементами геологического строения рудоносной площади Дарасун, выявлена физико-геологическая природа различных аномальных зон и, в конечном итоге, создана основа для оценки возможностей магниторазведки при решении различных геологических задач на стадиях поиска и разведки сульфидных кварцево-жильных месторождений золота в Сибирском регионе.

Ключевые слова:

Золоторудные месторождения, магнитное поле, магнитная восприимчивость горных пород, магнитная съемка.

Месторождение Дарасун расположено в отрогах Яблонового хребта, в административном отношении принадлежит Шилкинскому району Забайкальского края, в геологическом – Дарасуно-Балейской структурно-рудной зоне золото-молибденового пояса Забайкалья. Оно относится к золото-сульфидно-кварцевой формации [1] и по морфологии рудных тел является характерным представителем месторождений кварцево-жильного типа [2], такие месторождения распространены в складчатом обрамлении Западно-Сибирской платформы, Забайкалье, Яно-Колымском золоторудном поясе [3], ряд из них находится длительное время в эксплуатации или законсервированы с промышленно значимыми запасами благородного металла. Известно в отмеченных регионах и большое число геологически слабоизученных месторождений и рудопроявлений этого типа [4–6].

Согласно физико-геологической классификации [7], Дарасунское месторождение принадлежит к месторождениям, рудные тела которых локализованы в интрузивных породах.

Такие месторождения имеют повышенное содержание сульфидов в руде, достигающее 10–15 % и более; и, вследствие этого, составляют особую группу, физико-геологические свойства которой существенно отличаются от других месторождений этого класса, в частности от многочисленных и одинаковых по ряду геологических признаков малосульфидных кварцево-жильных месторождений, физико-геологические обстановки на которых рассмотрены в работе [8].

Дарасунское рудное поле сложено породами основного состава нижнепалеозойского возраста (амфиболиты, габбро, роговики), прорванные многофазной гранитоидной интрузией (гранодиориты, лейкократовые граниты и сиениты). Рудные тела – в основном кварц-золото-сульфидные жилы, имеющие значительную протяженность (до 2000 м) и толщину до 30 см. Золото в жилах связано с кварц-пиритовой, пирито-арсенопиритовой и халько-пиритово-бурнонитовой ассоциациями [2].

Рудоносная площадь Дарасуна весьма отчетливо проявляется в магнитном поле в целом повы-

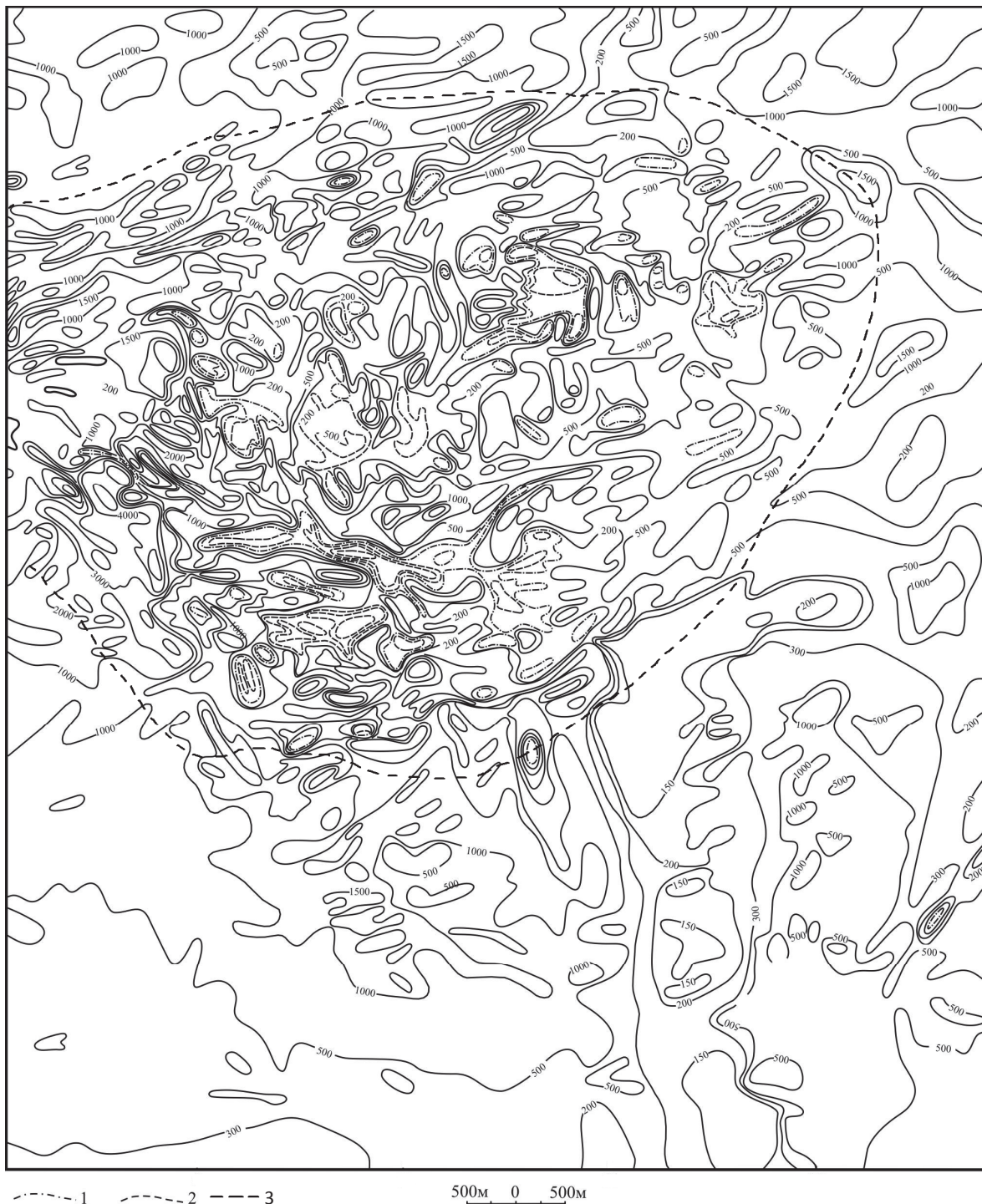


Рис. 1. Проявление золоторудной площади месторождения Дарасун в магнитном поле. Изолинии приращений вертикальной компоненты магнитной индукции в нТл, 1 – нулевая, 2 – отрицательная изолинии соответственно, 3 – граница рудного поля

Fig. 1. Manifestation of gold deposit area of Darasun in a magnetic field. Isolines of increments of magnetic induction vertical component are in nT, 1 – zero, 2 – negative contours, respectively, 3 – boundary of the ore field

шенными значениями приращений вертикальной составляющей амплитуды индукции и наличием интенсивной высокочастотной части в спектре ее изменения, рис. 1, 2.

Породы Дарасуна имеют низкие значения отношения остаточного и индуктивного намагничения и положительную корреляционную связь между магнитной восприимчивостью и величиной оста-

точного намагничивания (рис. 3), направления вектора которого практически не отличается от современного магнитного поля, что позволяет принимать наблюдаемую картину магнитного поля (рис. 1) однозначным отображением характера изменения магнитной восприимчивости пород.

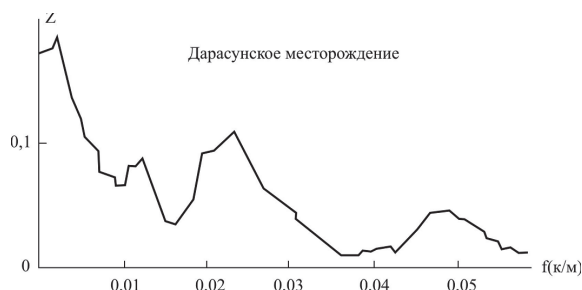


Рис. 2. График спектральной плотности дисперсии приращений индукции рудного поля

Fig. 2. Graph of spectral density of the ore field induction increments dispersion

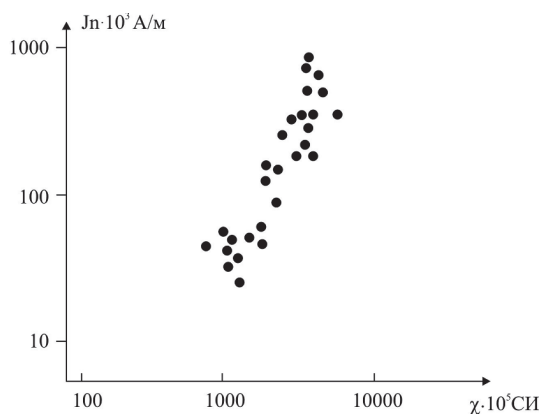


Рис. 3. Поле корреляции остаточной (J_n) намагниченности и магнитной восприимчивости (χ)

Fig. 3. Correlation field of residual (J_n) magnetization and magnetic susceptibility (χ)

Магнитная восприимчивость интрузивных образований Дарасунского района изменяется в очень широких пределах – от нескольких тысяч до единиц 10^{-5} СИ, оставаясь при этом в целом относительно высокой [8–12].

В непосредственных окрестностях рудного поля и в его пределах основные породы имеют разную магнитную восприимчивость: на месторождении она заметно повышена и в его пределах в ее изменениях достаточно уверенно выделяются относительно устойчивые группы образований, с существенно разной магнитной восприимчивостью. Высокая магнитная восприимчивость рудоносной площади обусловлена в основном двумя причинами. Известно, что процесс формирования оруденения в одноклассных породах при прочих равных условиях отдает предпочтение участкам с повышенной основностью [13], т. е. с повышенной «первичной» магнитной восприимчивостью, которая в дальнейшем, в ходе ряда геологических процес-

сов, изменяется. На данном месторождении она в целом увеличивается в связи с проявлениями начальной стадии биотитизации и кварц-полевошпатового метасоматоза пород, захватывающими значительную часть рудного поля, при которых в породе возрастает содержание железа, повышается степень его окисленности и образуется мелкокристаллический, чистый в отношении приместности магнетит, обладающий повышенной магнитной восприимчивостью по сравнению с реликтовым.

Повышенная спектральная плотность изменения амплитуды индукции на высоких частотах (рис. 2), визуально воспринимаемая на плане изолиний магнитного поля Дарасуна (рис. 1) как область обилия «мелких» возмущений, обусловлена проявлениями комплекса геологических процессов, создавших локальные изменения магнитной восприимчивости в породах рудного поля. К ним в основном относятся: тектонические и гидротермальные воздействия на породы, а также внедрение в массивы пород рудного поля малых интрузивных тел, контролируемых линейно вытянутыми тектоническими структурами. Все эти новообразования представляют практически немагнитные тела.

На площади рудного поля, как правило, интенсивно нарушена целостность пород, что создает область высокой проницаемости, являющейся не переменным условием формирования гидротермальных месторождений [14, 15]. В процессе тектонических воздействий в породе образуются как мелкие разрывные нарушения сплошности – трещины, так и различные значительные по толщине и протяженности образования – дизъюнктивы. При их формировании участки пород, подвергшиеся механическим воздействиям, снижают магнитную восприимчивость, во-первых, из-за «измельчения» породы в полости нарушения, приводящего к уменьшению количества магнитоэффективных минералов на единицу объема породы и, во-вторых, вследствие потери части магнитной восприимчивости «боковых» пород нарушений в процессе упругих напряжений, испытываемых породой [16, 17].

На месторождении сформированы многочисленные трещинные интрузии и штоки плагιοгранит-порфиров, гранодиорит-порфиров, а также дайки «пестрого» состава. Все эти образования имеют существенно отличную (в сторону уменьшения) магнитную восприимчивость от вмещающих их пород и, как и тектонические нарушения, создают различной формы и интенсивности «мелкие» в целом линейно-вытянутые возмущения в магнитном поле.

Значительную лепту вносят в структуры изменения магнитной индукции на высоких частотах и новообразования, сформированные в ходе гидротермальной деятельности в пределах рудного поля. Ими в основном являются околорудные метасоматиты. Собственно рудные тела – кварц-сульфидные жилы, имеющие практически нулевую

магнитную восприимчивость, не создают сколько-нибудь заметные искажения в наблюдаемом магнитном поле из-за весьма малой толщины (обычно первые сантиметры, редко первые дециметры в «раздувах») и «разрушенности» в приповерхностных условиях, где они, по магнитной восприимчивости (рис. 4), не отличаются от околорудных метасоматитов, представляющих практически немагнитные породы [18–20].

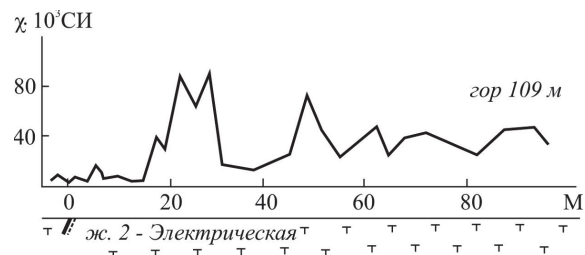


Рис. 4. Изменения намагниченности габбро-амфиболитов, вмещающих рудную жилу Дарасуна

Fig. 4. Changes in magnetization of gabbro-amphibolites host ore lode of Darasun

Толщина зон околорудно-измененных немагнитных пород всегда во много раз превышает толщину собственно кварц-сульфидных жил и составляет обычно несколько метров, рис. 5, а. В среднем, как это видно из приведенного рисунка, толщина немагнитного тела на Дарасуне составляет около 7 м. Она существенно непостоянна, рис. 5, б, что можно видеть и при изучении характера изменения отдельной магнитной зоны вдоль простирания отдельного рудного тела, рис. 6.

В связи со сказанным, уместно подчеркнуть, что толщина околорудно-измененных пород, определяемая по магнитному полю (магнитной восприимчивости пород), имеет прямую корреляционную связь с толщиной рудного тела и опосредованно связана с его продуктивностью (рис. 6), что, естественно, имеет важное практическое значение при поисково-разведочных работах, особенно при прослеживании и изучении рудных жил с дневной поверхности.

дованно связана с его продуктивностью (рис. 6), что, естественно, имеет важное практическое значение при поисково-разведочных работах, особенно при прослеживании и изучении рудных жил с дневной поверхности.

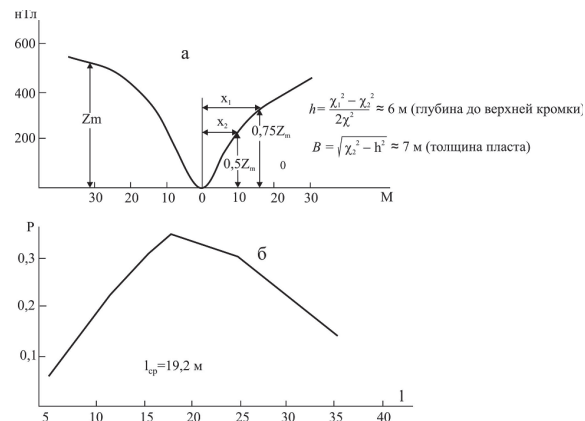


Рис. 5. Средняя форма (а) и гистограмма распределения ширины минимума (б) центральных минимумов аномальных зон над рудными жилами Дарасуна

Fig. 5. The average form (a) and distribution histograms of minimum width (b) of central minimum of anomalous zones over ore lodes of Darasun

О том, что высокочастотную часть спектра изменений магнитной индукции (рис. 2) формируют в значительной мере линейно вытянутые (в первом приближении) геологические неоднородности, а именно: тектонические нарушения, околорудные метасоматиты и дайковые тела, существенно отличающиеся по магнитной восприимчивости от вмещающих пород, можно судить, сопоставляя диаграммы направленности изолиний приращений индукции с простиранием этих неоднородностей, рис. 7.

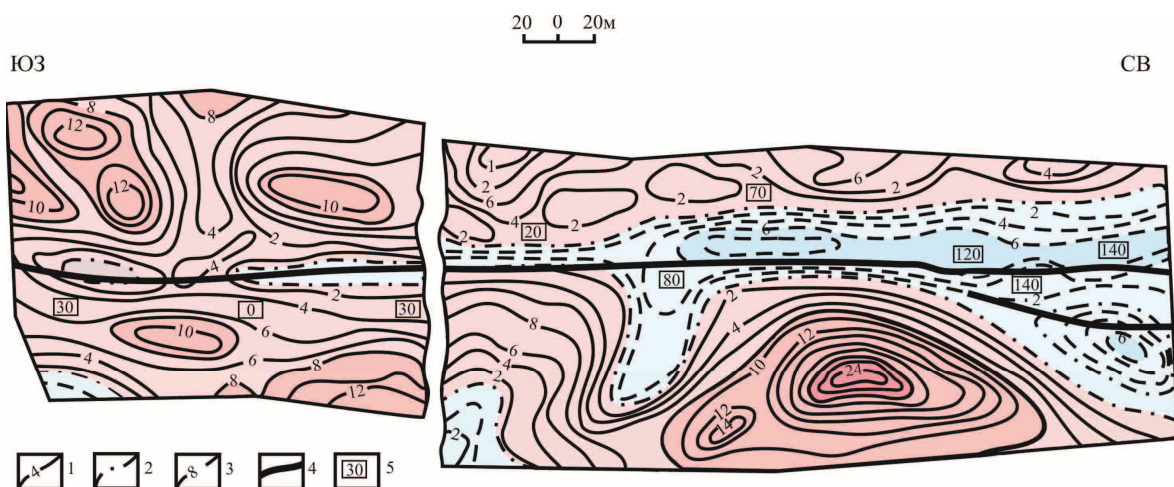


Рис. 6. Магнитное поле над жилой Ново-Кузнецовской Дарасунского месторождения. 1–3 – изодинамы ΔZ в нТл: полож., нулев., отр., 4 – рудная жила, 5 – среднее (по трем горизонтам) содержание золота в жиле, усл. ед.

Fig. 6. Magnetic field over Novo-Kuznetsov lode of Darasun field. 1–3 are the isodynamic curves ΔZ in nT: positive, zero, negative, 4 is the ore lode, 5 is the mean (by three horizons) gold content in the lode, c.u.

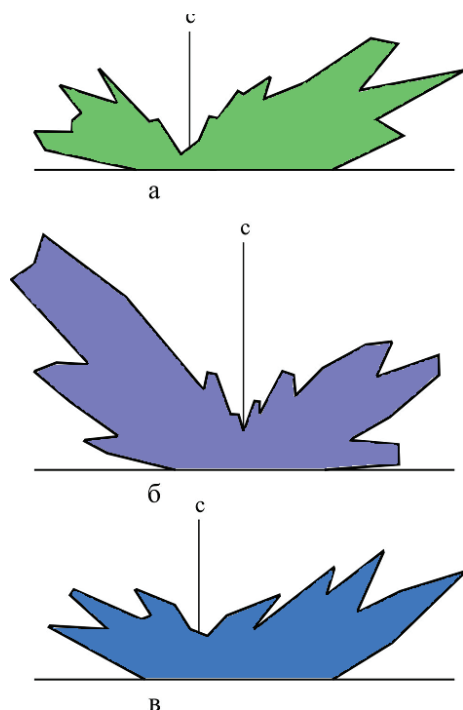


Рис. 7. Диаграммы направленности: а – изолинии индукции (пл. 8 км², сеть съемки 50×50 м, сечение 500 нТл); б – даек и тектонических нарушений; в – рудных жил Дарасунского месторождения.

Fig. 7. The direction patterns of: a) induction isolines (8 km², survey network is 50×50 m, the section is 500 nT); b) dikes and tectonic disturbances; v) ore lodes of Darasun field

Из приведенного рисунка также следует, что магнитное поле Дарасуна в целом является существенно анизотропным, в нем находят четкое отра-

жение главные направления тектонических структур месторождения – северо-восточное и северо-западное, преимущественное развитие которых в пределах рудного поля установлено геологическими исследованиями [21].

Выводы

Установлено, что золоторудное поле сульфидного кварцево-жильного месторождения, локализованного в интрузивных породах, четко выделяется в магнитном поле, во-первых, благодаря в целом повышенной индукции приращения амплитуды, соответствующей повышенной магнитной восприимчивости пород рудоносной площади и, во-вторых, повышенной спектральной плотностью дисперсии приращений индукции на высоких частотах, обусловленной развитием в пределах рудного поля значительных скоплений магнитных неоднородностей (в основном с пониженной магнитной восприимчивостью). Ими являются тектонические нарушения и связанные с некоторыми из них жильные рудные зоны и дайковые тела различных пород. Все они создают в первом приближении линейно вытянутые аномалии преимущественно северо-восточного и северо-западного простирания, что обуславливает анизотропию в изменениях магнитной индукции. Собственно золоторудные тела не создают в наблюдаемом магнитном поле заметных искажений, но они уверенно картируются в магнитном поле благодаря значительным по толщине (несколько метров) практически немагнитным околорудно измененным участкам пород, морфология которых опосредованно отражает продуктивность собственно рудной жилы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Выпуск «Золото» / Б.И. Беневольский и др. / отв. ред. Б.И. Беневольский, С.С. Вартамян. – М.: ЦНИГРИ, 2002. – 182 с.
2. Тимофеевский Д.А. Геохимия и минералогия Дарасунского золоторудного региона. – М.: Недра, 1972. – 260 с.
3. Золоторудные месторождения СССР. Т. 3. Геология золоторудных месторождений Западной и Восточной Сибири / под ред. В.А. Нарсеева, Д.А. Тимофеевского. – М.: ЦНИГРИ, 1986. – 322 с.
4. Алабин Л.В., Миронов А.Г., Жмодик С.М. Золото Сибири. Геодинамические условия, закономерности размещения, перспективы месторождений золота Сибири и Дальнего Востока // Труды III Всеросс. симпозиума. – Улан-Удэ, 21–25 сентября 2004. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦСОРАН, 2004. – С. 8–10.
5. Сизых Вал.И., Сизых Вит.И. Условия образования комплексных золоторудных месторождений Прибайкалья и Забайкалья // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: руководящие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд: Матер. научн. конф. – Иркутск, 3–7 октября 2005. – Иркутск: Изд-во Института географии СОРАН, 2005. – Т. 1 – С. 102–104.
6. Металлогения золота зеленокаменных поясов Восточного и Западного Саян / Т.Я. Корнев и др. – Красноярск: КНИИГМС, 2010. – 238 с.
7. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 80–86.
8. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геофизические и петрофизические исследования малосульфидных кварцево-жильных месторождений золота Сибири // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 56–61.
9. Кузмичева Е.В., Демидова В.А. К вопросу о закономерностях изменения магнитных свойств интрузивных пород Дарасунского района // Труды ЦНИГРИ. – 1968. – Вып. 74. – С. 57–61.
10. Стрелкина Е.М. О поведении титаносодержащих минералов при гидротермальном изменении амфиболитов на Дарасунском золоторудном месторождении // Геология рудных месторождений. – 1966. – № 6. – С. 52–57.
11. Мухаметшин А.М., Ломакина Е.А., Шепелева Е.Е. Эффективность подземной векторной магнитометрии при детальной разведке Дарасунского месторождения // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях: Матер. Всеросс. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения основателя Сибирской школы геофизиков / отв. ред. Л.Я. Ерофеев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 237–240.
12. Мухаметшин А.М. Дифференциация гранитной интрузии по магнитным свойствам «in situ» // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях: Матер. Всеросс. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения основателя Сибирской школы геофизиков / отв. ред. Л.Я. Ерофеев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 240–242.

13. Щербаков Ю.Г. Распределение и условия концентрации золота в рудных провинциях. – М.: Наука, 1967. – 268 с.
14. Шахов Ф.Н. Геология жильных месторождений. – М.: Наука, 1964. – 222 с.
15. Иванкин П.Ф., Рабинович К.Р. Золотоносные рудномагматические системы гранитоидного ряда // Геология и геофизика. – 1972. – № 5. – С. 42–47.
16. Капица С.П. Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1957. – № 6. – С. 489–504.
17. Нагата Т. Магнетизм горных пород. – М.: Мир, 1965. – 346 с.
18. Ерофеев Л.Я. Магнитное поле и природа аномалий на месторождениях золота. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1989. – 157 с.
19. Рудерман Е.Н. К созданию системы обнаружения золоторудных метасоматитов геофизическими и геохимическими методами // Геология и разведка. – 1990. – № 5. – С. 122–128.
20. Аномалии петромагнитных параметров, обусловленные сульфидной минерализацией, и прогноз оруденения в Яно-Колымском золотоносном поясе / С.В. Ворошин и др. // Тихоокеанская геология. – 2000. – Т. 19. – № 5. – С. 91–104.
21. Фогельман Н.А. Тектоника мезозойского сводчатого поднятия Забайкалья и закономерности размещения в его пределах золоторудных месторождений // Тр. ЦНИГРИ. – 1965. – Вып. 84. – С. 196.

Поступила 14.04.2015 г.

UDC 550. 83: 550. 814: 553: 41

MAGNETIC FIELD AND THE NATURE OF THE ANOMALIES ON THE SULFIDE QUARTZ-VEIN GOLD DEPOSITS (BY THE EXAMPLE OF DARASUN, EASTERN TRANS-BAIKAL)

Leonid Ya. Erofeev,

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

Galina V. Erofeeva,

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

The relevance of the discussed issue is caused by the need to study the natural physical fields and their relations with the geological environment.

The main aim of the work is to study the magnetic field and the nature of its changes on the typical Siberian sulfide quartz vein gold deposits Darasun.

The methods used in the study: specialized experimental methodological field magnetic survey of various observational accuracy and detail of network measurement, laboratory determination of magnetic susceptibility of purposefully selected samples of rocks and ores, statistical analysis of the data, comparing them to known elements of the geological structure of ore-bearing area and its surroundings.

The results. The authors have obtained the areal pattern of changes of magnetic induction increment within the ore field of Darasun deposit and its near neighborhood, determined the spectral composition of its changes, magnetic field and relationships with various elements of the geological structure of ore-bearing area Darasun, revealed physical and geological nature of various anomalous zones and provided a basis for assessing the possibilities of magnetic prospecting in solving various geological problems in the stages of prospecting and exploration of quartz-sulphide vein gold deposits in Siberia.

Key words:

Gold deposits, magnetic field, magnetic susceptibility of rocks, magnetic surveys.

REFERENCES

1. Benevolskiy B.I. *Metodicheskoe rukovodstvo po otsenke prognoznnykh resursov almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov* [Methodological guidance for estimating probable resources of diamonds, precious and base metals]. Eds. B.I. Benevolskiy, S.S. Vartanyan. Moscow, TSNIGRI Press, 2002. 182 p.
2. Timofeevskiy D.A. *Geokhimiya i mineralogiya Darasunskogo zolotorudnogo regiona* [Geochemistry and mineralogy of Darasun gold region]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 260 p.
3. *Zolotorudnye mestorozhdeniya SSSR. T. 3. Geologiya zolotorudnykh mestorozhdeniy Zapadnoy i Vostochnoy Sibiri* [Gold deposits of the USSR. Vol. 3. Geology of gold-ore deposits in Western and Eastern Siberia]. Eds. V.A. Narseev, D.A. Timofeevskiy. Moscow, TSNIGRI Press, 1986. 322 p.
4. Alabin L.V., Mironov A.G., Zhmodik S.M. *Zoloto Sibiri. Geodinamicheskie usloviya, zakonmernosti razmesheniya, perspektivy mestorozhdeniy zolota Sibiri i Dalnego Vostoka* [Gold of Siberia. Geodynamic conditions, patterns of distribution, prospects for gold deposits in Siberia and the Far East]. *Trudy III Vserossiyskogo simpoziuma* [Proc. III All-Russian symposium]. Ulan-Ude, 2004. pp. 8–10.
5. Sizykh Val.I., Sizykh Vit.I. *Usloviya obrazovaniya kompleksnykh zolotorudnykh mestorozhdeniy Pribaykalya i Zabaykalya* [Conditions of formation of complex gold deposits of the Baikal and Trans-Baikal regions]. *Materialy nauchnoy konferentsii. Blagorodnye i redkie metally Sibiri i Dalnego vostoka: rukovodyashchie sistemy mestorozhdeniy kompleksnykh i netraditsionnykh tipov rud* [Noble and rare metals of Siberia and the Far East: the governing system of complex fields and unconventional ore types]. Irkutsk, 2005. Vol. 1, pp. 102–104.
6. Kornev T.Ya. *Metallogeniya zolota zelenokamennykh pojasov Vostochnogo i Zapadnogo Sayana* [Gold metallogeny of green-

- stone belts of Eastern and Western Sayan]. Krasnoyarsk, KNII-GiMS Publ., 2010. 238 p.
7. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geologo-geofizicheskie usloviya na zolotorudnykh polyakh Sibiri [Geological and geophysical conditions in the gold fields of Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 80–86.
 8. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geofizicheskie i petrofizicheskie issledovaniya malosulfidnykh kvartsevo-zhilnykh mestorozhdeniy zolota Sibiri [Geophysical and petrophysical studies of low-sulfide quartz-vein gold deposits in Siberia]. *Geofizika*, 2014, no. 3, pp. 56–61.
 9. Kuzmicheva E.V., Demidova V.A. K voprosu o zakonomernostyakh izmeneniya magnitnykh svoystv intruzivnykh porod Darasunskogo rayona [On the issue of regularity of change in magnetic properties of intrusive rocks of Darasun area]. *Trudy TSNI-GRI*, 1968, vol. 74, pp. 57–61.
 10. Strelkina E.M. O povedenii titanosoderzhashchikh mineralov pri gidrotermalnom izmenenii amfibolitov na Darasunskom zolotorudnom mestorozhdenii [The behavior of titanium minerals in hydrothermally altered amphibolite on Darasun gold mine]. *Geology of Ore Deposits*, 1966, no. 6, pp. 52–57.
 11. Mukhametshin A.M., Lomakina E.A., Shepeleva E.E. Effektivnost podzemnoy vektornoy magnitometrii pri detalnoy razvedke Darasunskogo mestorozhdeniya [Efficiency of underground vector magnetometry with detailed exploration of Darasun field]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya osnovatelya Sibirskoy shkoly geofizikov «Geofizicheskie metody pri razvedke nedr i ekologicheskikh issledovaniyakh»* [All-Russian scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of the founder of the Siberian School of geophysicists]. Ed. by L.Ya. Erofeev. Tomsk, TPU Publ. House, 2003. pp. 237–240.
 12. Mukhametshin A.M. Differentsiatsiya granitnoy intruzii po magnitnym svoystvam «insitu» [Differentiation of granitic intrusions on the magnetic properties «insitu»]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya osnovatelya Sibirskoy shkoly geofizikov «Geofizicheskie metody pri razvedke nedr i ekologicheskikh issledovaniyakh»* [All-Russian scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of the founder of the Siberian School of geophysicists]. Ed. by L.Ya. Erofeev. Tomsk, TPU Publ. House, 2003. pp. 240–242.
 13. Shcherbakov Yu.G. *Raspredelenie i usloviya konferentsii zolota v rudnykh provintsyakh* [Distribution and conference conditions of gold in ore provinces]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 268 p.
 14. Shakhov F.N. *Geologiya zhilnykh mestorozhdeniy* [Geology of vein deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 222 p.
 15. Ivankin P.F., Rabinovich K.R. Zolotonosnye rudnomagmatische sistemy granitoidnogo ryada [Gold-bearing ore magmatic systems of granitoid series]. *Russian Geology and Geophysics*, 1972, no. 5, pp. 42–47.
 16. Kapitsa S.P. Magnitnye svoystva izverzhennykh gornykh porod pri mekhanicheskikh napryazheniyakh [Magnetic properties of igneous rocks under mechanical stress]. *Izv. ANSSSR. Ser. geofiz.*, 1957, no. 6, pp. 489–504.
 17. Nagata T. *Magnetizm gornykh porod* [Magnetism of rocks]. Moscow, Mir Publ., 1965. 346 p.
 18. Erofeev L.Ya. *Magnitnoe pole i priroda anomalii na mestorozhdeniyakh zolota* [Magnetic field and the nature of the anomalies in the fields of gold]. Tomsk, Tomsk state university Press, 1989. 157 p.
 19. Ruderman E.N. K sozdaniyu sistemy obnaruzheniya zolotorudnykh metasomatitov geofizicheskimi i geokhimicheskimi metodami [Development of the system for detecting gold metasomatite by geophysical and geochemical methods]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 5, pp. 122–128.
 20. Voroshin S.V. Anomalii petromagnitnykh parametrov, obuslovlennyye sulfidnoy mineralizatsiyey, i prognoz orudneniya v Yano-Kolymskom zolotonosnom poyase [Anomalies of petromagnetic parameters caused by sulphide mineralization and mineralization forecast in the Yana-Kolyma gold belt]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2000, vol. 19, no. 5, pp. 91–104.
 21. Fogelman N.A. Tektonika mezozoyskogo svodchatogo podnyatiya Zabaykalya i zakonomernosty razmeshcheniya v ego predelakh zolotorudnykh mestorozhdeniy [Tectonics of Mesozoic vaulted uplift in Trans-Baikal and patterns of distribution of gold deposits within its boundaries]. *Trudy TSNI-GRI*, 1965, vol. 84, pp. 196.

Received: 14 April 2015.

УДК 004.492.2

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Кукало Иван Анатольевич,

аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: i@kukalo.ru

Гривцов Сергей Николаевич,

ведущ. специалист отдела координации охранной деятельности Службы безопасности АО «Транснефть – Центральная Сибирь», Россия, 634050, г. Томск, ул. Набережная р. Ушайки, д. 24. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности системы физической защиты линейной части магистрального нефтепровода от совершения актов незаконного вмешательства, в частности с 2003 по 2012 гг. на объектах ОАО «АК «Транснефть» было выявлено 4779 фактов несанкционированных врезок в магистральный нефтепровод.

Цель исследования: разработка математической модели по управлению рисками физической безопасности для линейной части магистрального нефтепровода, реализующей принципы ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010.

Методы исследования: матричный и линейный анализ, статистический анализ распределения рисков событий, метод априорного ранжирования, проверка статистических гипотез.

Результаты. Разработана методика управления величиной риска физической безопасности для пространственно-протяженных объектов типа линейной части магистрального нефтепровода. Предложена структурная математическая модель, реализующая процесс управления величиной риска физической безопасности в соответствии с принципами ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010. На этой основе рассмотрен способ распределения ресурсов по времени и участкам линейной части магистрального нефтепровода между несколькими подразделениями, осуществляющими охрану одного магистрального нефтепровода. Описана процедура динамической адаптации параметров математической модели в ходе поступления информации о совершенных актах незаконного вмешательства, а также результатах проведения проверочных мероприятий по их имитации. Произведен анализ пространственно-временного распределения рископонижающего потенциала и уровня риска физической безопасности для участка магистрального нефтепровода «Александровское–Анжеро-Судженск» длиной 100 км. Проведено сравнение рископонижающего потенциала фактически проведенных контрольных мероприятий и мероприятий, предлагаемых к проведению при использовании разработанной методики управления. Показано увеличение рископонижающего потенциала мероприятий на 1 млн 169 тыс. р. и продемонстрировано соответствующее повышение эффективности процесса управления на 26 % за счет обеспечения более равномерного распределения контрольных мероприятий по участкам линейной части магистрального нефтепровода.

Ключевые слова:

Линейная часть магистрального нефтепровода, оценка рисков, управление рисками физической безопасности, пространственно-временное распределение риска, рископонижающий потенциал.

Основные меры, обеспечивающие безопасность, в том числе антитеррористическую защищенность линейных объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в Российской Федерации, устанавливаются Федеральным законом [1]. Известные подходы к управлению безопасностью систем масштаба ТЭК в значительной мере основываются на процедуре категорирования опасных объектов, в результате которой объектам одной категории предъявляются единые требования по обеспечению безопасности [2]. Альтернативой процедуре категорирования является подход по управлению рисками систем физической безопасности (СФБ). Создание подобных систем управления сопряжено с необходимостью решения нескольких взаимосвязанных задач, включающих установление области применения, оценку риска и воздействие на риск [3].

Процедура установления области применения основывается на моделях злоумышленника и угроз СФБ, которые для объектов линейной части магистрального нефтепровода (ЛЧ МН) были описаны нами в работе [4]. Ранее была разработана ме-

тодика оценки величины риска [5], основанная на методике оценки рисков в иерархических структурах критически важных объектов [6] и адаптированная на пространственно-распределенные линейные объекты ТЭК типа ЛЧ МН, учитывая зарубежные [7–9] и отечественные [10–12] разработки по управлению эксплуатационными рисками магистральных нефте- и газопроводов. Основной целью настоящего исследования является разработка последнего элемента системы управления – методики управления величиной риска физической безопасности (ФБ). Кроме того, должно быть проведено обобщение результатов предшествующих исследований [5] в виде структурной математической модели по управлению рисками, реализующей принципы ГОСТ [3].

ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010 выделяет два обязательных процесса, которые должны быть разработаны в системе управления – управление инфраструктурой риска (ИР) и управление риском (УР). Взаимосвязь указанных процессов представлена в виде функциональной схемы (рис. 1).

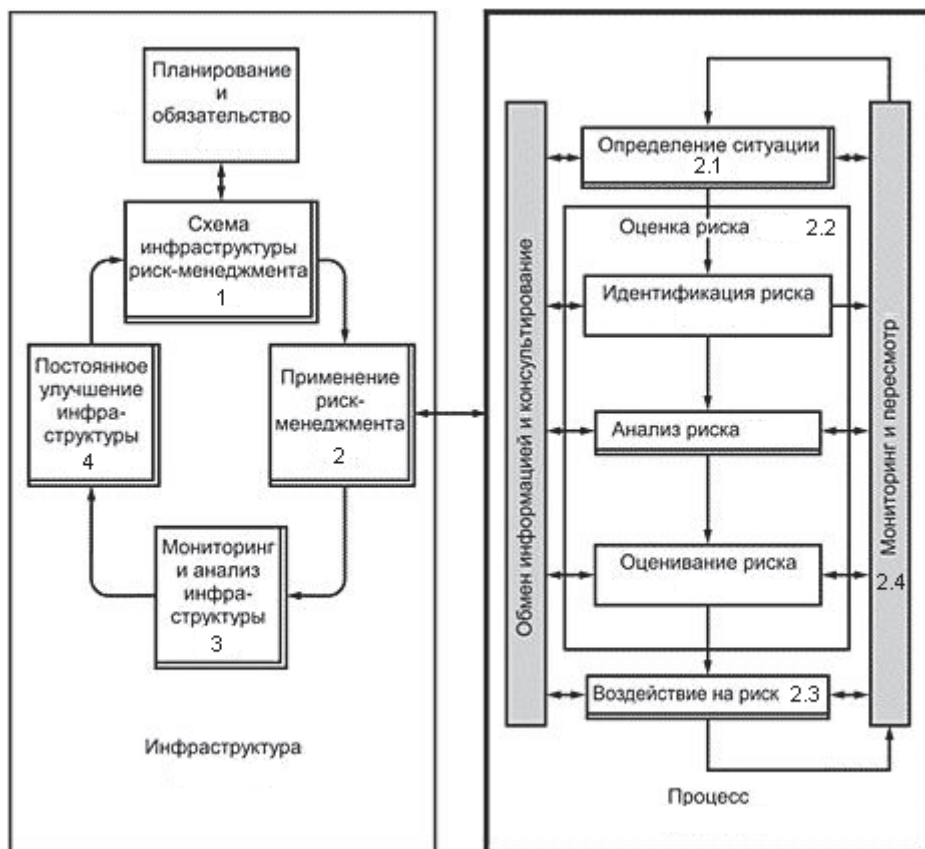


Рис. 1. Взаимосвязи между инфраструктурой и процессом управления величиной риска

Fig. 1. Interaction between the infrastructure and control over risk magnitude

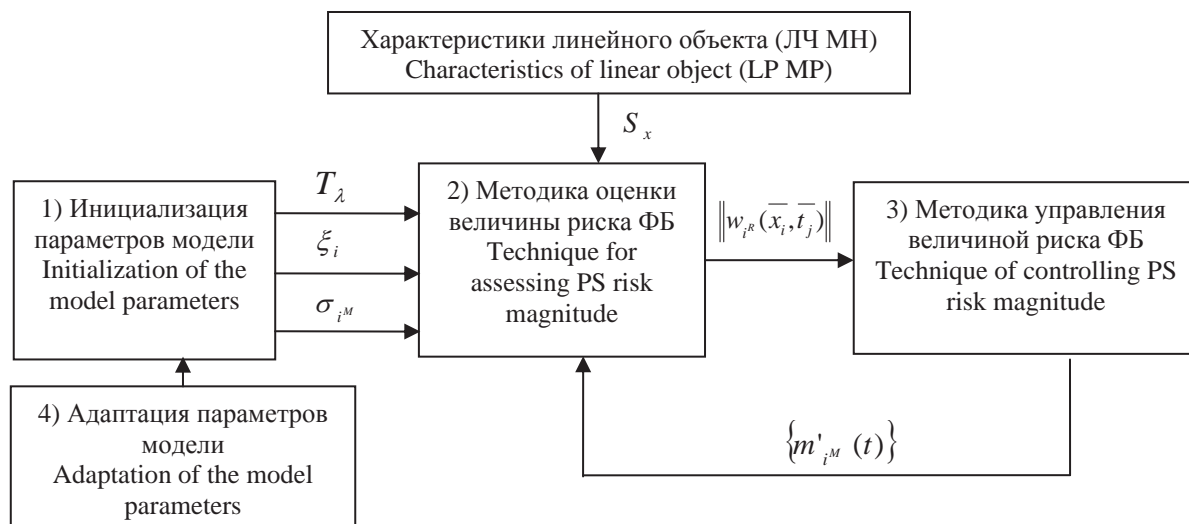


Рис. 2. Структурная математическая модель по управлению величиной риска ФБ

Fig. 2. Structural mathematical model for controlling PS risk magnitude

Авторами была проведена адаптация описанной выше концепции для системы управления рисками ФБ ЛЧ МН. Для этого была проведена привязка этапов ГОСТ к соответствующим элементам системы управления. Результаты сопоставления представлены в табл. 1.

Практическая реализация этапов 2.1–2.4 системы управления обеспечивается структурной математической моделью, которая реализует процесс управления величиной риска ФБ. Схема разработанной модели представлена на рис. 2.

Таблица 1. Реализация принципов ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010

Table 1. Implementation of principles of the State Standard R ISO/MEK 31000–2010

№	Этап процесса по ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010 Stage of the process by the State Standard R ISO/MEK 31000–2010	Система управления рисками ФБ ЛЧ МН Control system of physical safety risk of the linear part of the main oil pipeline (PS LP MP)
1	Разработка ИР Development of risk infrastructure (RI)	Разработка модели управления рисками ФБ ЛЧ МН Development of the model for controlling the risks of PS LP MP
2	Применение ИР Application of RI	Внедрение модели управления рисками ФБ ЛЧ МН Introduction of the model for controlling the risks PS LP MP
2.1	Определение ситуации Definition of situation	Инициализация модели Model initialization
2.2	Оценка риска Risk assessment	Методика оценки рисков ФБ [5] Technique for estimating PS [5]
2.3	Воздействие на риск Risk treatment	Методика управления величиной риска ФБ Technique for controlling PS risk magnitude
2.4	Пересмотр процесса УР Review of risk management (RM)	Адаптация параметров модели Adaptation of the model parameters
3	Мониторинг и анализ ИР Monitoring and analysis of RI	Подбор дополнительных информативных входных параметров для модели Selection of additional informative input parameters for the model
4	Постоянное совершенствование ИР Constant improvement of RI	Корректирование структуры модели управления рисками ФБ Correction of the structure of PS risk control model

Использование математической модели начинается с определения периода по управлению величиной риска T_λ , расчета коэффициентов опасности участков ЛЧ МН ξ , оценки коэффициентов эффективности обнаружения рисков события $\sigma_{\text{вм}}$ для каждого из типов контрольных мероприятий. Затем производится оценка величины риска ФБ $\|w_{i\tau}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$, результаты которой циклически используются при планировании очередного набора контрольных мероприятий $\{m_r(t)\}$. Периодически после выявления актов незаконного вмешательства проводится адаптация параметров модели на основе полученной информации о месте и времени их совершения.

Рассмотрим подробнее каждый из элементов математической модели.

Инициализация модели

Представленные в ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010 и используемые в модели процессы базируются на классическом цикле Шухарта–Деминга (PDCA). В практической деятельности PDCA используется многократно с различной периодичностью. При выполнении основной деятельности циклически повторяющийся процесс PDCA применяется с пе-

риодичностью циклов отчетности и планирования [13], таким образом, возникает проблема определения периода цикла T_λ для процесса управления величиной риска.

Отчетность и планирование мероприятий по обеспечению безопасности ЛЧ МН определяется отраслевым регламентом ОАО «АК «Транснефть» [14] и предполагает, что T_λ совпадает с промежуток времени между совершенными актами незаконного вмешательства. Совершенствование процесса осуществляется после выявления акта незаконного вмешательства и сопровождается составлением отчетных документов по инциденту и планированием нового цикла.

В табл. 2 представлены статистические данные по количеству наиболее распространенных актов незаконного вмешательства – незаконных врезок в ЛЧ МН [15], доля которых в общей структуре преступных посягательств на объекты МН составляет около 70 %.

Таблица 2. Статистические показатели по совершению незаконных врезок в ЛЧ МН

Table 2. Statistic values of illegal taps into LP MP

Наименование субъекта РФ Territorial entity of the RF	λ , инцидентов/год (2012) λ , incidents/year (2012)
Самарская область/Samara region	42
Ханты-Мансийский АО Khanty-Mansiysk AD	22
Иркутская область/Irkutsk region	21
Дагестан/Dagestan	20
Волгоградская область Volgograd region	11
Ростовская область/Rostov region	9
Ульяновская область Ulyanovsk region	7
Краснодарский край, Тюменская область Krasnodar territory, Tyumen region	6
Омская область/Omsk region	3
Ставропольский край Stavropol territory	2
Адыгея, Коми, Курганская область, Оренбургская область, Приморский край, Рязанская область, Саратовская область, Тверская область, Томская область , Ярославская область Adygea, Komi, Kurgan region, Orenburg region, Primorsk territory, Ryazan region, Saratov region, Tver region, Tomsk region, Yaroslavl region	1
Другие субъекты РФ Other territorial entities of the RF	0

Первичный анализ представленных данных позволяет выделить субъекты РФ:

- с высоким уровнем преступности – врезки совершаются с частотой до одного раза в месяц;
- со средним уровнем преступности – врезки совершаются с частотой от одного раза в месяц до одного раза в квартал;

- с низким уровнем преступности – врезки совершаются с частотой менее одного раза в квартал. В частности, Томская область относится к регионам с низким уровнем преступности: в области отмечается положительная динамика по снижению уровня криминогенной обстановки. В 2011 г. на территории области были обнаружены две несанкционированные врезки в МН, в 2012 г. – одна врезка, в 2013 г. врезки зафиксированы не были [15].

Применительно к используемой математической модели и с учетом [5] первичный процесс инициализации ее параметров определяется по следующему алгоритму:

- 1) с использованием известных методов прогнозирования [16–18], на основании имеющихся статистических данных (табл. 1) и оценки частоты совершения актов незаконного вмешательства, рассчитывается период планирования T_λ для ЛЧ протяженностью S_x по формуле:

$$T_\lambda = \frac{1}{\lambda},$$

где λ – частота обнаружения актов незаконного вмешательства.

- 2) определяются группы факторов Gr_a и F_{ab} факторы, влияющие на степень опасности участков ЛЧ МН;
- 3) определяются весовые коэффициенты ρ_i и q_{ab} , учитывающие степень влияния указанных факторов и их групп на вероятность совершения акта незаконного вмешательства;
- 4) методом балльной оценки факторов [19–21] рассчитываются коэффициенты опасности участков ЛЧ МН ξ_i ;
- 5) с учетом T_λ , а также имеющихся ресурсов определяется множество проводимых типов мероприятий $k_{i,m} \in K^M$;
- 6) для всех $k_{i,m}$ методом априорного ранжирования [22] определяются коэффициенты эффективности обнаружения рисков события $\sigma_{i,m} \in (0,1)$.

Методика оценки величины риска ФБ

После определения необходимых параметров модели, следуя [5], мы можем определить первоначальное пространственно-временное распределение вероятности совершения акта незаконного вмешательства $p_{i,r}^0(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$, где $\bar{x}_i \in (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m) \in S_x$ – участок ЛЧ МН; $\bar{t}_j \in (\bar{t}_1, \dots, \bar{t}_n) \in T_\lambda$ – интервал времени с постоянным шагом. Значения $p_{i,r}^0(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ образуют матрицу распределения величины $\|p_{i,r}^0(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ (табл. 2).

Отметим также, что рассматриваемая методика позволяет рассчитать вероятность рисков событий по времени $p_r(\bar{t}_j)$ и по произвольному участку ЛЧ МН $p_r(\bar{x}_i)$, как:

$$p_{i,r}(\bar{t}_j) = \sum_{i=1}^m p_{i,r}(\bar{x}_i, \bar{t}_j); \quad p_{i,r}(\bar{x}_i) = \sum_{j=1}^n p_{i,r}(\bar{x}_i, \bar{t}_j).$$

Значения $p_r(\bar{x}_i)$ и $p_r(\bar{t}_j)$ позволяют разработать способ распределения ресурсов между несколькими

подразделениями, осуществляющими охрану одного МН, на основе данных о первоначальном пространственно-временном распределении вероятности совершения акта незаконного вмешательства.

Таблица 3. Матрица распределения $\|p_{i,r}^0(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$

Table 3. Distribution matrix $\|p_{i,r}^0(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$

t	x				
	\bar{x}_1	...	\bar{x}_i	...	\bar{x}_m
\bar{t}_1	$p_{i,r}(\bar{x}_1, \bar{t}_1)$	...	$p_{i,r}(\bar{x}_i, \bar{t}_1)$	...	$p_{i,r}(\bar{x}_m, \bar{t}_1)$
...
\bar{t}_j	$p_{i,r}(\bar{x}_1, \bar{t}_j)$	...	$p_{i,r}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$	...	$p_{i,r}(\bar{x}_m, \bar{t}_j)$
...
\bar{t}_n	$p_{i,r}(\bar{x}_1, \bar{t}_n)$	...	$p_{i,r}(\bar{x}_i, \bar{t}_n)$	...	$p_{i,r}(\bar{x}_m, \bar{t}_n)$

Пусть охрану ЛЧ МН осуществляют Z подразделений, каждое из которых обеспечивает охрану своего участка ЛЧ МН S_z . Учитывая значения $p_{i,r}(\bar{x}_i)$ для участков ЛЧ Z_s , предложим формулу (1) распределения ресурсов (таких как денежные средства, оборудование, трудовые ресурсы и пр.), выделяемых для подразделений, обеспечивающих охрану ЛЧ МН S :

$$Q_{S_z} = \frac{\sum_{S_z} p_{i,r}(\bar{x}_i) S_z}{\sum_{S_x} p_{i,r}(\bar{x}_i) S_x} Q_S, \quad (1)$$

где Q_{S_z} – величина выделенных ресурсов для подразделения Z ; Q_S – общая величина ресурсов, выделенных на поддержку защищенности ЛЧ МН S .

Аналогичный подход может быть применен для временного распределения – разделим общий плановый период охраны T_λ на b частей протяженностью T_b (месяц, квартал и т. д.). Учитывая значения $p_r(\bar{t}_j)$ для участков ЛЧ T_b , предложим аналогичную формулу (2) распределения имеющихся ресурсов (таких как количество рабочих смен, отпусков, горюче-смазочных материалов, денежных средств и пр.) по времени:

$$Q_{T_b} = \frac{\sum_{T_b} p_{i,r}(\bar{t}_j) T_b}{\sum_{T_\lambda} p_{i,r}(\bar{t}_j) T_\lambda} Q_{T_\lambda}, \quad (2)$$

где Q_{T_b} – величина выделенных ресурсов для периода T_b ; Q_{T_λ} – общая величина ресурсов.

Для оценки величины риска ФБ наряду с определением вероятности нежелательного события должен быть также произведен расчет потерь в результате наступления рисков события [23]. Для линейных объектов транспортной инфраструктуры цену риска c_r (величину ущерба) можно определить как обобщающий показатель некоторых частных значений ущерба физической безопасности ЛЧ МН для рисков события [2] по следующей формуле:

$$c_{i^R} = c_{i^R_{\text{э}}} + c_{i^R_{\text{ад}}} + c_{i^R_{\text{ааэ}}} + c_{i^R_{\text{эиэ}}},$$

где $c_{i^R_{\text{э}}}$ – финансовый ущерб, определяемый численностью погибших и пострадавших; $c_{i^R_{\text{тр}}}$ – финансовый ущерб от кражи транспортируемого сырья и уменьшения грузопотока; $c_{i^R_{\text{бал}}}$ – балансовая стоимость сооружения или стоимость восстановления; $c_{i^R_{\text{экол}}}$ – стоимостное выражение ожидаемого экологического ущерба.

Тогда матрица распределения величины $\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ может быть определена по формуле умножения матрицы на число

$$\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| = c_{i^R_{\text{э}}} \|p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|.$$

Матрица $\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ определяет динамическое, пространственно-временное распределение риска ФБ. Матрица является источником формирования дополнительных интегральных количественных показателей, участвующих в процессе поддержки принятия решений по распределению имеющихся ресурсов для снижения величины риска.

В качестве примера таких показателей в работе [5] было введено понятие накопленного риска $W_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ – абсолютной величины, описывающей уровень риска в монетарном выражении для участка ЛЧ МН \bar{x}_i на момент времени \bar{t}_j . Также был введен относительный показатель уровня риска $E_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$, выраженный в долях и позволяющий оценить динамику риска произвольного участка ЛЧ. Формулы для расчета показателей приведены в [5].

В дальнейшем рассматриваемая методика позволяет производить переоценку распределения вероятности на основе поступающей информации

о множестве проведенных мероприятий $M^w = \{m^w(t), k_{i^w}\}$, где $i^w \in I^M$ – множество индексов мероприятий; $k_{i^w} \in K^M$ – множество типов мероприятий; $m^w(t)$ – относительная координата мероприятия на ЛЧ МН; $i^T \in (0, T_\lambda)$ – шаги планирования очередного множества мероприятий.

Множество мероприятий, проведенных на шаге $i^T \in T_\lambda$, как показано в [5], позволяют определить результирующую матрицу распределения $\|p_{i^R}^i(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$. Каждому мероприятию соответствует матрица коррекции $\|\Delta p_{i^R}^i(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$, состоящая из матрицы снижения вероятности $\|p_{i^R}^i(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ и матрицы перераспределения вероятности $\|p_{i^R}^{i^T}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$, связанные формулой

$$\begin{aligned} \|p_{i^R}^{i^T}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| &= \|p_{i^R}^{i^T-1}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| + \|\Delta p_{i^R}^{i^T}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| = \\ &= \|p_{i^R}^{i^T-1}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| + (\|p_{i^R}^{i^T}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| + \|p_{i^R}^{i^T}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|). \end{aligned}$$

На основе матрицы снижения вероятности определим основной количественный показатель процесса управления рисками – величину рискоснижающего потенциала мероприятия [6] в монетарном выражении $U_{i^R}^{i^T}$

$$U_{i^R}^{i^T} = U_{i^R}(M^{i^T}) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i^R}^{i^T}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) \right) c_{i^R},$$

где c_{i^R} – величина ущерба от совершения акта незаконного вмешательства.

Для каждого мероприятия определим показатель, который будет отражать эффективность мероприятия относительно других возможных мероприятий, которые могли быть проведены в тоже время на альтернативных участках ЛЧ МН

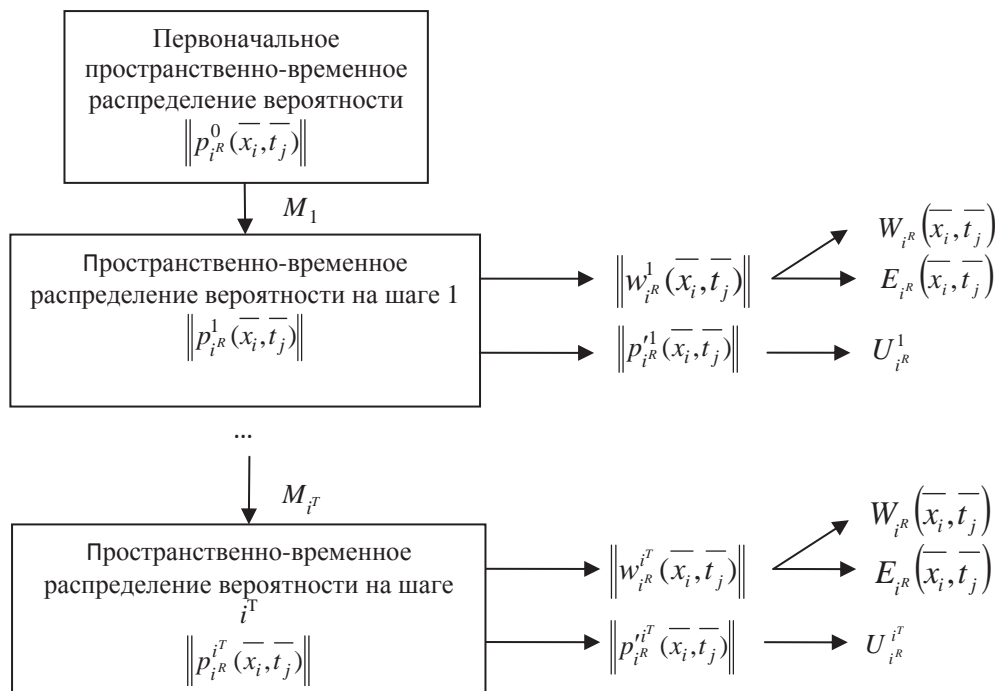


Рис. 3. Функциональная схема методики оценки риска

Fig. 3. Functional diagram of the technique for risk assessment

$$r_U = \frac{U_{i^R}^{i^T}}{\max(U_{i^R}^{i^T})},$$

где $\max(U_{i^R}^{i^T})$ – максимально возможное значение рископонижающего потенциала при проведении мероприятия на альтернативном участке ЛЧ МН.

Функциональная схема методики оценки риска, согласно которой осуществляется переоценка распределения вероятностей, величины риска, а также других интегральных количественных показателей, представлена на рис. 3.

Методика управления величиной риска ФБ

Цикл управления величиной риска T_M совпадает с промежутками времени между контрольными мероприятиями. Отчетные и плановые документы процесса управления рисками формируются до и после проведения контрольных мероприятий соответственно. Перед проведением мероприятия происходит мониторинг рисков, их оценка и планирование с учетом значения величины риска. Воздействие на величину риска осуществляется при проведении контрольных мероприятий.

Жизненный цикл процесса управления представим в виде четырехступенчатого алгоритма:

1) определяется тип проводимого мероприятия k_{i^M} ;

По формуле (3) устанавливается протяженность планируемого мероприятия Δx для всех участков ЛЧ МН, где мероприятие m_{i^M} может быть проведено:

$$\Delta x = \frac{t_s(V \cdot V_{i^M}) - 2V_{i^M}(S_M - S_B)}{V - V_{i^M}}, \quad (3)$$

где Δx – протяженность контрольного мероприятия; S_M – место проведения контрольного мероприятия на ЛЧ МН; S_B – место расположения охранного подразделения; V – скорость перемещения охранного подразделения к месту проведения мероприятия; V_{i^M} – скорость проведения контрольного мероприятия типа i^M ; t_s – общее время, выделенное для проведения контрольного мероприятия.

На рис. 4 представлена типовая схема проведения контрольного мероприятия, состоящая из трех этапов – перемещение к месту проведения мероприятия, проведение контрольного мероприятия и возвращение к месту дислокации охранного подразделения.

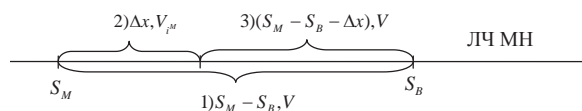


Рис. 4. Типовая схема проведения контрольного мероприятия

Fig. 4. Typical circuit of control activity

- 2) определяется значение показателя r_U для всех участков ЛЧ МН, где мероприятие m_{i^M} может быть проведено;
- 3) определяется множество мест для проведения контрольного мероприятия $\{m_{i^M}^1\}$, где $r_U=1$;
- 4) случайным образом из множества $\{m_{i^M}^1\}$ определяется место для проведения контрольного мероприятия m_{i^M} .

Адаптация модели

Коррекция исходных данных модели осуществляется после получения информации о совершенных актах незаконного вмешательства, а также результатах проведения проверочных мероприятий по их имитации. В результате анализа полученных данных пересматриваются коэффициенты мероприятий $\sigma_{k_{i^M}}$, способствовавших выявлению или не выявлению актов незаконного вмешательства. Таким образом, процесс адаптации базируется на анализе множества проведенных мероприятий $M^* = \{m_{i^M}(t), k_{i^M}\}$ и сведениях о реальном либо проверочном акте незаконно вмешательстве A^* .

Если акт совершен в момент времени T^* в точке ЛЧ МН X^* , т. е. $A^* = (X^*, T^*)$, тогда мы получаем такое распределение $\|p_{i^*}^*(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$, где $p_{i^*}(X^*, T^*)=1$, для остальных элементов матрицы $p_{i^*}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)=0$. Если точное время T^* не известно, а известен промежуток времени \bar{t}^* , в течение которого был произведен акт незаконного вмешательства, тогда его вероятность равномерно распределяется с учетом правила нормировки $p_{i^*}(X^*, \bar{t}_j)=1$, где $\bar{t}_j \in \bar{t}^*$.

Перед процедурой пересмотра всех параметров модели мы определяем множество мероприятий, проведенных в точке X^* ЛЧ МН $M^* = \{m_{i^M}(t), k_{i^M}\}$, где $m_{i^M}(t) \cap X^*$. При необходимости пересматривается $k_{i^M} \in (0, 1)$ для всех k_{i^M} , коэффициенты ξ_i, ρ_i, q_{ab} , характеризующие уязвимость в точке X^* , а также ему подобных участков ЛЧ МН. Производится сравнение результирующего значения шаге $\|p_{i^*}^*(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ и значения распределения на предыдущем шаге $\|p_{i^*}^{s-1}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$.

Отметим также, что после выявления реального акта незаконного вмешательства цикл управления заканчивается, происходит переход к новому периоду T_λ .

Апробация методики управления

В качестве примера рассмотрим результаты применения предлагаемой методики для управления величиной риска ФБ одного из МН, пролегающего на территории Томской области. При этом будем использовать следующие входные параметры:

- λ – 1 инцидент/год, $t_{нач}$ – 01.01.2014, $t_{кон}$ – 31.12.2014;
 - S – участок МН «Александровское–Анжеро-Судженск» длиной 100 км ($x_{нач}=0,0$; $x_{кон}=100,0$ км);
 - $M = \{m_{i^M}(t), k_{i^M}\}$ – данные о мероприятиях, проведенных сотрудниками филиала ООО «Транснефть-Охрана» Центрально-Сибирское межрегиональное управление ведомственной охраны с 01.01.2014 по 31.12.2014.
- В качестве внутренних параметров определим:
- $c_{i^M} = 30$ млн р.;
 - обследование на автомобиле $k=0,3$; пешее обследование $k=0,4$; обследование подъездных путей к МН $k=0,1$ и пр.;
 - $h_t = 1$ мин и $h_x = 100$ м;
 - $\xi_i = 1$.

Апробацию методики управления будем осуществлять путем сравнения количественных показателей эффективности для реальных и моделируемых данных. Моделирование будет заключаться в подборе участка ЛЧ МН для проведения контрольного мероприятия в соответствии с методикой управления величиной риска физической безопасности. Тип мероприятия и время его проведения не будут изменяться, новое место проведения будет подбираться с максимальной приближенностью к реальным данным о месте проведения мероприятия.

На рис. 5 данные о фактически проведенных мероприятиях представлены в виде отрезков, характеризующих время и место их проведения. Ось абсцисс отражает место проведения контрольных мероприятий (участок ЛЧ МН), ось ординат отражает время их проведения.

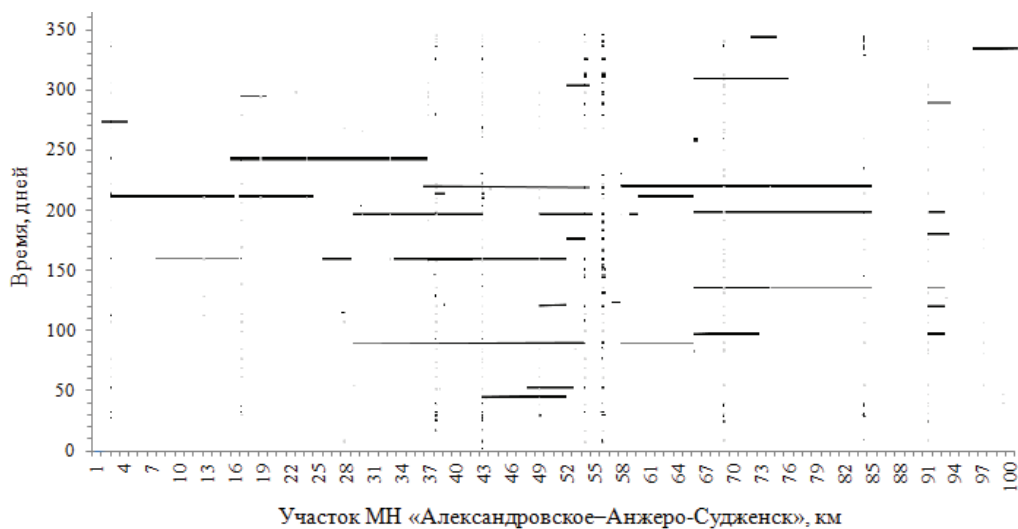


Рис. 5. Фактические данные о проведенных мероприятиях

Fig. 5. Real data on the activities

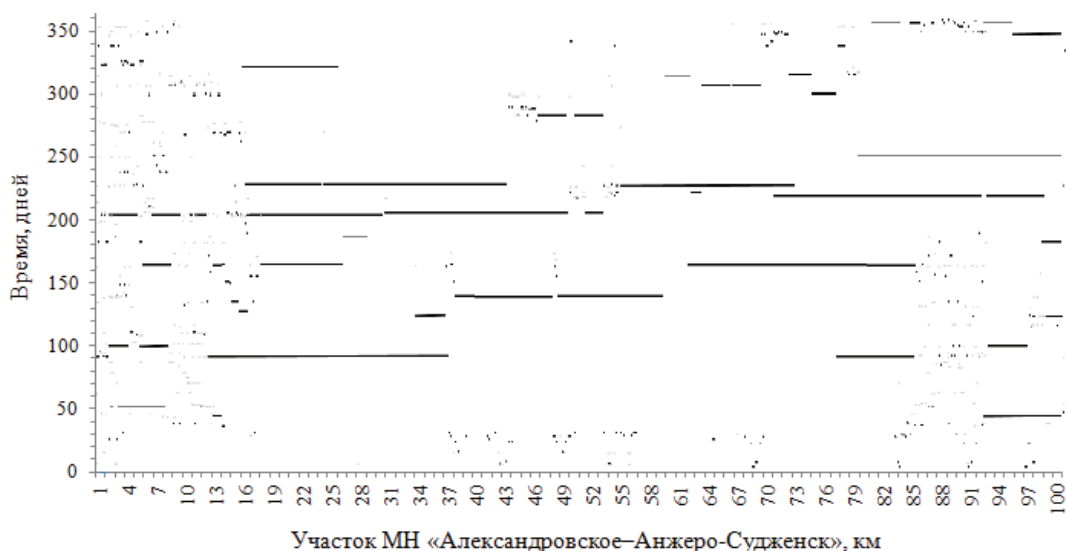


Рис. 6. Смоделированные данные о проведенных мероприятиях

Fig. 6. Modeled data on the activities

На рис. 6 представлены данные, смоделированные с помощью методики управления рисками ФБ.

Из сравнения рис. 5 и 6 видно, что на первом из них присутствуют параллельные отрезки, т. е. повторяющиеся участки проведения контрольных мероприятий, а также пустые области графика, которые показывают участки ЛЧ МН, где мероприятия не проводились. На рис. 5 такие отрезки отсутствуют, а места проведения мероприятий распределены более равномерно по участкам ЛЧ МН.

Оценку эффективности методики управления данными будем осуществлять путем сравнения значений рискоснижающего потенциала U_p^r для фактических и смоделированных с использованием методики мероприятий. Значение рискоснижающего потенциала отображает монетарное значение

эффективности контрольных мероприятий, которое учитывает различную опасность участков ЛЧ МН, различную степень эффективности разных типов контрольных мероприятий, частоту проведения контрольных мероприятий на различных участках ЛЧ МН.

Графики распределения значения $U_{\text{р}}^i$ по участкам ЛЧ МН и по времени для фактических и смоделированных мероприятий представлены на рис. 7, 8.

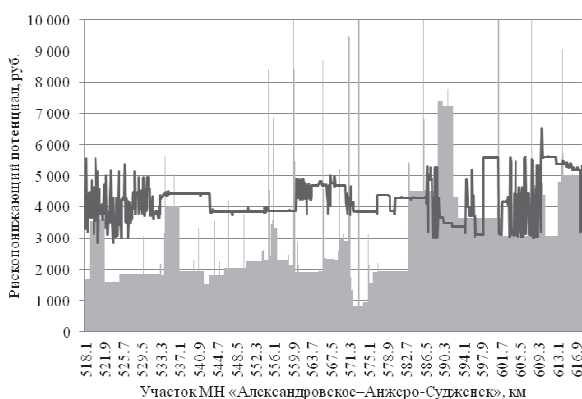


Рис. 7. Распределение величины рископонижающего потенциала по участкам ЛЧ МН

Fig. 7. Distribution of the risk-reducing potential value in the areas of the LP MP

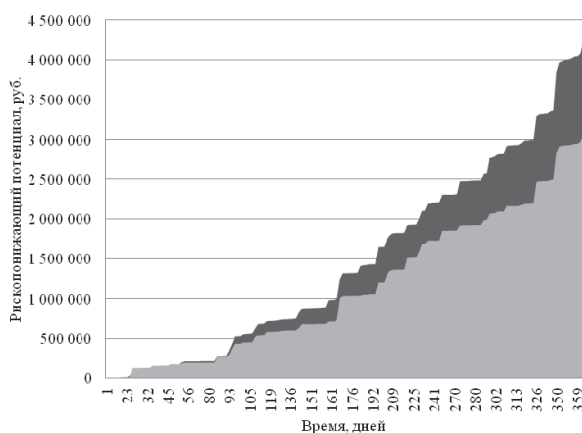


Рис. 8. Распределение величины рископонижающего потенциала по времени

Fig. 8. Time distribution of the risk-reducing potential value

В результате сравнения графиков установлено, что общий уровень недополученного рископонижающего потенциала составил 1 млн 169 тыс. р., а среднее значение r_v для данных о фактических мероприятиях – 0,74. Таким образом, основной показатель эффективности снижения значения риска находится на уровне 74 %, и, соответственно, может быть повышен при использовании разработанной методики управления на 26 %. Увеличение рископонижающего потенциала было достигнуто за счет обеспечения более равномерного распределения контрольных мероприятий по участкам ЛЧ МН, снижения влияния «человеческого фактора»

при планировании мероприятий и увеличения таким образом равнозащищенности ЛЧ МН и равномерности распределения ресурсов на обеспечение охраны ЛЧ МН.

Оценку эффективности методики управления также можно осуществить путем сравнения уровня риска $E_{\text{р}}$ для фактических и смоделированных данных, рассчитанного с помощью методики оценки риска [5]. Для этого на рис. 9, 10 были построены графики $E_{\text{р}}$ с помощью графопостроителя «contourf» пакета Matlab, в котором топология поверхности массивов $E_{\text{р}}$ в трехмерном пространстве изображается в виде цветового набора двумерных линий постоянного уровня. При этом наглядную информацию об изменении функции дает заливка прямоугольника на плоскости XY (участок ЛЧ МН-время) цветом, зависящим от значения функции в точках плоскости (значения уровня риска). Красные области графика плоскости соответствуют областям с наибольшим значением уровня риска и выделяют наиболее опасные места (во времени для участка ЛЧ МН). Синие участки выделяют наименее опасные места, где за счет информации, полученной в ходе проведения контрольных мероприятий, вероятность появления рисковогго события была уменьшена.

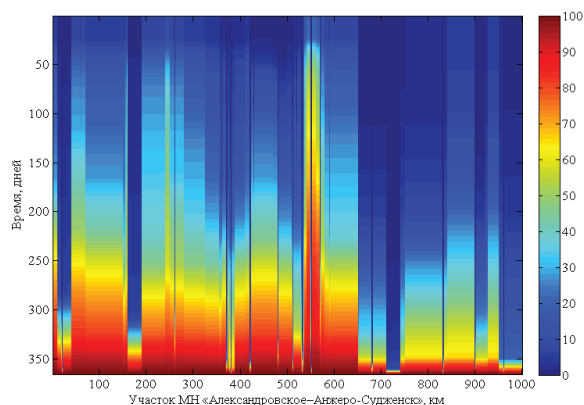


Рис. 9. Фактическое распределение уровня риска ФБ

Fig. 9. Real distribution of the PS risk level

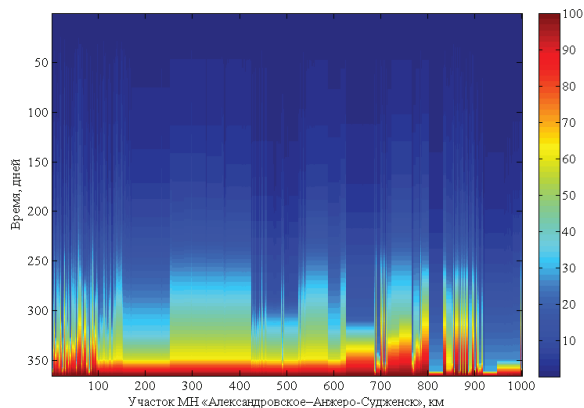


Рис. 10. Модель распределения уровня риска ФБ

Fig. 10. Model of the PS risk level distribution

Графики, представленные на рис. 9 и 10, позволяют подтвердить предположение о более равномерном распределении ресурсов на обеспечение охраны ЛЧ МН с использованием разработанной методики управления, поскольку наглядно позволяют сравнить распределение уровня риска для фактических и смоделированных данных.

Предложенные выше модель и методика проходят апробацию и внедрение в АО «Транснефть – Центральная Сибирь» в виде автоматизированной системы (АС) поддержки принятия решений при планировании мероприятий по охране ЛЧ МН. Среди специализированных АС схожей направленности можно выделить разработки зарубежных компаний по управлению рисками эксплуатации МН [24–26].

АС реализована в соответствии с принципами двухуровневой сетевой архитектуры, где в качестве сервера выступает система управления базами данных (БД) Microsoft SQL Server 2008, а клиентская часть представлена в виде исполняемого приложения, разработанного в среде Microsoft Visual Studio на языке программирования С#. Основная часть алгоритмов работы АС и, в частности, предложенная выше модель и методика управления реализована на уровне БД с использованием языка программирования Transact-SQL.

Выводы

Приведено описание методики управления величиной риска ФБ для пространственно-протяженных объектов типа ЛЧ МН, разработанной на основе методик по управлению эксплуатационными рисками магистральных нефте- и газопроводов [10–12]. Методика предполагает проведение контрольных мероприятий на тех участках МН, где

значение рискоснижающего потенциала наиболее велико, и позволяет создать динамическую, самосогласованную систему управления процессом охраны ЛЧ МН. Данная система основана на структурной математической модели, реализующей принципы ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство». Описана формализованная процедура динамической адаптации параметров математической модели в ходе поступления информации о совершенных актах незаконного вмешательства, а также результатах проведения проверочных мероприятий по их имитации.

Указанная методика дополняется способом распределения ресурсов, трудовых, финансовых и др., между несколькими подразделениями, осуществляющими охрану одного МН. Способ основан на анализе данных о первоначальном пространственно-временном распределении вероятности совершения акта незаконного вмешательства.

Для оценки эффективности разработанной методики и модели произведен расчет и сравнение выходных параметров рискоснижающего потенциала и уровня риска для фактических и смоделированных мероприятий на произвольном участке МН «Александровское–Анжеро-Судженск» длиной 100 км. При этом показано, что величина рискоснижающего потенциала мероприятий могла быть увеличена на 1 млн 169 тыс. руб., а рассчитанная таким образом эффективность процесса управления могла быть повышена на 26 %. Увеличение рискоснижающего потенциала было достигнуто за счет более равномерного распределения контрольных мероприятий по участкам ЛЧ МН, что позволило более эффективно распределить имеющиеся ресурсы на обеспечение безопасности ЛЧ МН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 2011 г. № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» // Российская газета – издание Правительства Российской Федерации, официальный публикатор документов. 2011. URL: <http://www.rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (дата обращения: 28.01.2015).
2. Кононов А.А., Стиславский А.Б., Цыгичко В.Н. Управление рисками нарушения транспортной безопасности. – М.: АС-Траст, 2008. – 210 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2011. – 28 с.
4. Кукало И.А., Кшнянкин А.П., Гривцов С.Н. Модель угроз системы физической защиты линейной части магистрального нефтепровода // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 37–41.
5. Кукало И.А., Гривцов С.Н. Оценка рисков физической безопасности линейной части магистрального нефтепровода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 30–42.
6. Оценка рисков в иерархических структурах критически важных объектов / А.А. Кононов, К.В. Черныш, Д.С. Гуревич, А.К. Поликарпов // Труды ИСА РАН / под ред. Д.С. Черешкина. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – Т. 52. – С. 5–15.
7. D’Atri M.F., Rodríguez D., Garcia-Martinez R. Improving pipeline risk models by using data mining techniques // 24th World Gas Conference. – Buenos Aires, 2009. URL: <http://sistemas.unla.edu.ar/sistemas/gisi/papers/24th-WGC-Paper-663.pdf> (дата обращения: 28.01.2015).
8. Selva R., Eng C., Mech F.I. Risk Based Inspection (RBI) Best Practice: The Technical Specification for Ensuring Successful Implementation // 13th International Conference on Pressure Vessel & Piping Technology. – London, 2012. URL: http://www.ppsimtech.com/downloads/risk_based_inspection_best_practice-the_technical_specification_ron_selva_pp_simtech_keynote_paper_1_13th_icpvt_2012_london.pdf (дата обращения: 28.01.2015).
9. Selvik J.T., Scarf P., Aven T. An extended methodology for risk based inspection planning // Reliability: Theory & Applications. – 2011. – № 20. URL: http://gnedenko-forum.org/Journal/2011/012011/RTA_1_2011-12.pdf (дата обращения: 28.01.2015).
10. Лисанов М.В., Савина А.В. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 1. – С. 50–56.
11. Иванов В.И., Панчиков В.Н. Техническое диагностирование и оценка риска аварии в нефтегазовой отрасли // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 1. – С. 68–71.
12. Газпром «ВНИИГАЗ». Применение анализа риска в управлении техническим состоянием и целостностью линейной части магистральных газопроводов. URL: http://riskprom.ru/_ld/2/270_._._.pdf (дата обращения: 28.01.2015).

13. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 544 с.
14. ОР-13.310.00-КТН-032–15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Руководство по организации охраны объектов и линейной части магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов ОАО «АК «Транснефть». – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2015. – 203 с.
15. Информация о работе подразделений безопасности ОАО «АК «Транснефть» проводимой в целях противодействия преступным посягательствам на линейную часть магистральных трубопроводов. URL: <http://www.transneft.ru/files/2013-01/sgBHMOLZn5fcvai.pdf> (дата обращения: 28.01.2015).
16. Методологические основы прогнозирования научно-технологического развития России до 2030 г. с использованием критериев стратегических рисков. Координационный совет РАН по прогнозированию. URL: <https://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=4e42ec47-32bb-44ba-abe8-7f2cd63de687> (дата обращения: 28.01.2015).
17. Дуброва Т.А. Статистические метод прогнозирования. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 206 с.
18. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
19. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ рисков и управление безопасностью: методические рекомендации / науч. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГФ «Знание», 2008. – 672 с.
20. СТО Газпром 2–2.3–351–2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». – М.: ОАО «Газпром», 2009. – 380 с.
21. Рекомендации по учету влияния технико-технологических, природно-климатических и других факторов при прогнозировании аварийности на МГ ОАО «Газпром». – М.: ОАО «Газпром», 2007. – 118 с.
22. Блинов И.Г., Валушок А.В., Старочкин А.В. К вопросу об уточнении степени коррозионной опасности участков магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 2 (14). – С. 58–61.
23. Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 3. – С. 58–63.
24. The Synergi Pipeline software. URL: <https://www.dnvgl.com/services/pipeline-integrity-management-synergi-pipeline-1363> (дата обращения: 28.01.2015).
25. Pipeline Risk Controller Version 2.0 for Windows. URL: <http://www.gulfpub.com/product.asp?ProductID=2428> (дата обращения: 28.01.2015).
26. The Multi-Analytic Risk Visualization. URL: http://www.dnv.com/moreondnv/research_innovation/programmes/materials/sensors/marv.asp (дата обращения: 28.01.2015).

Поступила 11.03.2015 г.

UDC 004.492.2

RISK MANAGEMENT OF PHYSICAL SAFETY OF THE MAIN OIL PIPELINE LINEAR PART

Ivan A. Kukalo,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: i@kukalo.ru

Sergey N. Grivtsov,

JSC «Transneft – Central Siberia», 24, Naberezhnaya Ushayki street, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

Relevance of the work is caused by the need to improve the efficiency of the physical protection system of linear part of the main oil pipeline (LCh MN) from committing acts of unlawful interference, in particular from 2003 to 2012, 4779 facts of unauthorized connection to the linear part of the main oil pipeline were revealed at the facilities of OJSC «Transneft».

The main aim of the study is to develop a mathematical model for risk management of physical safety for the linear part of the main oil pipeline, implementing the principles of GOST R ISO/IEC 31000–2010.

The methods used in the study: matrix and linear analysis, statistical analysis of the distribution of risk events, methods of ranking, statistical hypothesis testing.

Results. The authors have developed the method of controlling the amount of physical safety risk for spatially extended objects such as the linear part of the main oil pipeline. The paper introduces the structural mathematical model that realizes physical safety risk management in accordance with the principles of GOST R ISO/IEC 31000–2010. On this basis, we consider the method of resource allocation in time and parts of the linear part of the main oil pipeline between several units, ensuring the protection of a single main oil pipeline. The paper describes the procedure of dynamic adaptation of the mathematical model parameters at entry of data on committed acts of unlawful interference, as well as the results of the verification activities in their simulation. The authors analyzed the spatial and temporal distribution of the physical safety risk and the potential to reduce the risk of the 100 km area of the «Aleksandrovsky–Anzhero-Sudzhensk» linear part of the main oil pipeline and compared the potential to reduce risk of the actual control measures and the measures proposed to conduct when using the developed management technique. The paper shows the increase of the risk-reduce potential by 1 million 169 thousand rubles and demonstrates the compliance management efficiency by 26 % by providing more uniform distribution of control measures on sections of the linear part of the main oil pipeline.

Key words:

Oil pipeline linear part, risk assessment, risk management of physical security, spatio-temporal risks distribution, risk reduction potential.

REFERENCES

1. *Federalnyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21 iyulya 2011 g. № 256-FZ «O bezopasnosti obektov toplivno-energeticheskogo kompleksa»* [Federal Law of 21 July 2011 № 256-FZ «On the safety of the fuel and energy complex»]. Available at: <http://www.rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (accessed 28 January 2015).
2. Kononov A.A. *Upravlenie riskami narusheniya transportnoy bezopasnosti* [Risk management violations of transport safety]. Moscow, AS-Trast Publ., 2008. 210 p.
3. *GOST R ISO/MEK 31000-2010. Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo* [State Standard 31000-2010. Risk management. Principles and Guidelines on Implementation]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 28 p.
4. Kukalo I.A., Kshnyankin A.P., Grivtsov S.N. Model ugroz sistemy fizicheskoy zashchity lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda [Model of physical protection system threat in the main oil pipeline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 37-41.
5. Kukalo I.A., Grivtsov S.N. Otsenka riskov fizicheskoy bezopasnosti lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda [Risk assessment of physical safety of the main oil pipeline linear part]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 30-42.
6. Kononov A.A., Chernysh K.V., Gurevich D.S., Polikarpov A.K. Otsenka riskov v ierarkhicheskikh strukturakh kriticheski vaznykh obektov [Risk assessment in hierarchical structures of critical facilities]. *Trudy ISA RAN*, 2010, no. 52, pp. 5-15.
7. D'Atri M. F., Rodriguez D., Garcia-Martinez R. Improving pipeline risk models by using data mining techniques. *Proc. 24th World Gas Conference*. Buenos Aires, 2009. Available at: <http://sistemas.unla.edu.ar/sistemas/gisi/papers/24th-WGC-Paper-663.pdf> (accessed 28 January 2015).
8. Selva R., Eng C., Mech F.I. Risk Based Inspection (RBI) Best Practice: The Technical Specification for Ensuring Successful Implementation. *Proc. 13th International Conference on Pressure Vessel & Piping Technology*. London, 2012. Available at: http://www.ppsimtech.com/downloads/risk_based_inspection_best_practice-the_technical_specification_ron_selva_pp_simtech_keynote_paper-1_13th_icpvt_2012_london.pdf (accessed 28 January 2015).
9. Selvik J.T., Scarf P., Aven T. An extended methodology for risk based inspection planning. *Reliability: Theory & Applications*, 2011, no. 20. Available at: http://gnedenko-forum.org/Journal/2011/012011/RTA_1_2011-12.pdf (accessed 28 January 2015).
10. Lisanov M.V., Savina A.V. Metodicheskoe rukovodstvo po otsenke stepeni riska avarii na magistralnykh nefteprovodakh i nefteproduktprovodakh [Methodological guidance on assessing the risk of accidents on the trunk pipeline network]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2013, no. 1, pp. 50-56.
11. Ivanov V.I., Panchikov V.N. Tekhnicheskoe diagnostirovanie i otsenka riska avarii v neftegazovoy otrasli [Technical diagnosis and assessment of risk of accident in oil and gas industry]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2012, no. 1, pp. 68-71.
12. *Gazprom «VNIIGAZ». Primenenie analiza riska v upravlenii tekhnicheskim sostoyaniem i tselostnostyu lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov* [Gazprom «VNIIGAZ». Application of risk analysis in management of technical condition and integrity of the linear part of main gas pipelines]. Available at: http://riskprom.ru/_ld/2/270_..._.pdf (accessed 28 January 2015).
13. Repin V.V., Eliferyov V.G. *Protessny podkhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protessov* [Process approach to management. Business Process Modeling]. Moscow, Mann, Ivanov and Ferber Publ., 2013. 544 p.
14. *OR-13.310.00-KTN-032-15. Magistralny truboprovodny transport nefti i nefteproduktov. Rukovodstvo po organizatsii okhrany obektov i lineynoy chasti magistralnykh nefteprovodov i nefteproduktprovodov OJSC «Transneft»* [Industry regulations OR-13.310.00-KTN-032-15. Trunk pipeline transportation of crude oil and petroleum products. Guidelines for the organization and protection of the linear part of the main oil and product pipelines of OJSC «Transneft»]. Moscow, OJSC «Transneft», 2015. 203 p.
15. *Informatsiya o rabote podrazdeleniy bezopasnosti OJSC «Transneft» provodimoy v tselyakh protivodeystviya prestupnym posyagatelstvam na lineynuyu chast magistralnykh truboprovodov* [Information on the work of security units of OJSC «Transneft» conducted in order to counter criminal attacks on the linear part of the main pipelines]. Available at: <http://www.transneft.ru/files/2013-01/sgBHMOLZn5fcvai.pdf> (accessed 28 January 2015).
16. Metodologicheskie osnovy prognozirovaniya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossii do 2030 g. s ispolzovaniem kriteriev strategicheskikh riskov [Methodological bases of forecasting scientific and technological development of Russia until 2030, using the criteria of strategic risks]. *Koordinatsionny sovet RAN po prognozirovaniyu* [Coordination Council of Russian Academy of Sciences Forecasting]. Available at: <https://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=4e42ec47-32bb-44ba-a6e8-7f2cd63de687> (accessed 28 January 2015).
17. Dubrova T.A. *Statisticheskie metod prognozirovaniya* [Statistical forecasting methods]. Moscow, YUNITI-DANA Publ., 2003. 206 p.
18. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. *Matematicheskie metody postroeniya prognozov* [Mathematical forecasting methods]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1997. 112 p.
19. Prolov K.V. *Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskije aspekty. Analiz riskov i upravlenie bezopasnostyu: metodicheskie rekomendatsii* [Russia's security. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Risk analysis and safety management: guidelines]. Moscow, MGOF «Znanie» Publ., 2008. 672 p.
20. *STO Gazprom 2-2.3-351-2009. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska dlya opasnykh proizvodstvennykh obektov gazotransportnykh predpriyatiy OAO «Gazprom»* [Gazprom organization standard 2-2.3-351-2009. Methodological guidelines for risk analysis for hazardous production facilities of gas transmission companies of OJSC «Gazprom»]. Moscow, OJSC «Gazprom», 2015. 380 p.
21. *Rekomendatsii po uchetu vliyaniya tekhniko-tekhnologicheskikh, prirodno-klimaticheskikh i drugikh faktorov pri prognozirovanii avariynosti na MG OAO «Gazprom»* [Recommendations for the calculation of the influence of technical and technological, natural climatic and other factors in the prediction of accidents on main pipelines of OJSC «Gazprom»]. Moscow, OJSC «Gazprom», 2007. 118 p.
22. Blinov I.G., Valyushok A.V., Starochkin A.V. K voprosu ob utochenii stepeni korrozionnoy opasnosti uchastkov magistralnykh nefte- i nefteproduktprovodov [The issue of improving the degree of corrosion hazard for areas of the main oil pipelines]. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technology*, 2014, no. 2 (14), pp. 58-61.
23. Savina A.V., Sumskey S.I., Lisanov M.V. Analiz riska avarii na magistralnykh truboprovodakh pri obosnovanii minimalnykh bezopasnykh rasstoyaniy [Analysis of the risk of accidents on main pipelines in justification of minimum safety distances]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2012, no. 3, pp. 58-63.
24. *The Synergi Pipeline software*. Available at: <https://www.dnvgl.com/services/pipeline-integrity-management-synergi-pipeline-1363> (accessed 28 January 2015).
25. *Pipeline Risk Controller Version 2.0 for Windows*. Available at: <http://www.gulfpub.com/product.asp?ProductID=2428> (accessed 28 January 2015).
26. *The Multi-Analytic Risk Visualization*. Available at: http://www.dnv.com/moreondnv/research_innovation/programmes/materials/sensors/marv.asp (accessed 28 January 2015).

Received: 11 March 2015.

УДК 519.171.1

МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ВЕРШИН ГРАФА И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗОМОРФИЗМА

Погребной Андрей Владимирович,

магистрант кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: avpogrebnoy@gmail.com

Погребной Владимир Кириллович,

д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: vkp@tpu.ru

Актуальность. Одной из актуальных проблем современной прикладной теории графов является моделирование связей между структурой объекта и его свойствами. Важное место при установлении такой связи занимает проблема идентификации и оценивания сходства структур. Известные подходы к оцениванию сходства структур в энергетике, геоинформационных системах, компьютерной химии, и, в частности в нефтехимии, ограничиваются использованием набора косвенных признаков и не рассматривают возможности решения проблемы, основываясь на прямых признаках, связанных с изоморфизмом.

Цель научной работы: сформулировать теоретические основы метода дифференциации вершин графов, показать возможные применения метода для оценки сходства структур и решения проблемы изоморфизма, рассматривая его как частный случай полного сходства структур.

Методы исследования основаны на применении прикладной теории графов, теории построения и анализа эффективных алгоритмов, моделирования структур с помощью автоматных моделей, применении теории интеграции кодов структурных различий в процессе дифференциации вершин.

Результаты. Сформулирована проблема идентификации структуры графа, объединяющая проблемы инвариантного описания структуры и получения полного инварианта графа, изоморфизма графов, оценивания сходства структур. Показано, что решение перечисленных задач в основном сводится к решению проблемы дифференциации вершин в структуре графа. Введено три вида структурных различий в графе – базовые, скрытые, виртуальные. Предложена автоматная модель структуры графа, положенная в основу метода дифференциации вершин и разработки алгоритмов вычисления полных инвариантов со свободной интеграцией кодов структурных различий (алгоритм ISD-F), зависимой (ISD-D) и независимой (ISD-I). Рассмотрены особенности применения данных алгоритмов при решении проблемы изоморфизма и возможности разработки алгоритма для оценивания сходства структур на основе взаимозависимой интеграции кодов. Проведены экспериментальные исследования алгоритмов при вычислении полных инвариантов и проверке на изоморфизм графов, содержащих до 5000 вершин. Эксперименты показали высокую эффективность алгоритмов при решении этих задач.

Ключевые слова:

Идентификация структуры графа, полный инвариант графа, изоморфизм графов, интегральный описатель структуры, автоматная модель структуры, дифференциация вершин графа.

Проблема установления связей между структурой объекта и его свойствами является одной из важных задач прикладной теории графов. Такие связи широко применимы в компьютерной химии [1–4], энергетике [5], геоинформационных системах [6] и многих других областях. Среди задач моделирования «структура–свойство» важное место занимает проблема идентификации структур. Решение этой проблемы позволит разработать эффективные методы представления, поиска и оценки сходства структур. В данной статье предложен математический инструмент в виде метода дифференциации вершин, составляющий основу решения перечисленных задач, включая получение инвариантного описателя структуры, определение изоморфизма и вычисление полного инварианта.

О проблеме идентификации структур графов

Два обыкновенных графа $G=(E_G, U_G)$ и $H=(E_H, U_H)$ с множествами вершин E_G, E_H , $|E_G|=|E_H|$ и рёбер U_G, U_H , $|U_G|=|U_H|$ являются изоморфными, если существует вариант совмещения вершин множеств E_G и E_H , при котором все рёбра множеств U_G и U_H также

оказываются совмещены. Очевидно, что в изоморфных графах G и H совмещаемые вершины должны иметь равные степени. Известно большое число других характеристик, равенство которых в сравниваемых графах является необходимым условием их изоморфизма [7]. На основе учёта таких характеристик разработано большое разнообразие эвристических алгоритмов определения изоморфизма, как правило, ориентированных на отдельные типы графов: для ациклических – это, например [8, 9], для планарных – [10].

В общем случае для определения изоморфизма графов G и H , содержащих по n вершин, необходимо перебрать $n!$ вариантов совмещения вершин множеств E_G и E_H . При таких объёмах вычислений даже весьма значительные успехи эвристических алгоритмов по сокращению этих объёмов для частных случаев в целом остроту проблемы изоморфизма не снижают [11]. Попытки решить задачу тестирования изоморфизма без получения подстановки вершин сравниваемых графов G и H также нельзя признать успешными [12]. Так, для двух изоморфных графов Пейли 17-го порядка програм-

ма тестирования, приведённая в [12], показала, что эти графы неизоморфны.

Следует признать, что в теории графов сложилась парадоксальная ситуация, которую можно обозначить как отсутствие возможностей для однозначной идентификации структуры графа. Действительно, принимаясь за исследование очередного графа, мы не можем установить – является ли он одним из ранее рассмотренных. Для однородных графов такая ситуация возникает уже, например, при приближении значений n к 15–20 вершинам. Что касается неоднородных графов, содержащих десятки и сотни вершин, то для таких размерностей даже применение алгоритмов, учитывающих специфику отдельных графов, объёмы вычислений часто становятся также нереалистичными [11, 13].

Получается, что в теории графов нет инструмента для описания основного объекта исследований – структуры графа. Произвольная нумерация вершин, которая традиционно используется для представления графа в компьютер, не является инвариантным описанием его структуры, т. е. независимым от нумерации вершин. Один и тот же граф с произвольными нумерациями вершин воспринимается как два разных графа.

При анализе структур графов, в частности в компьютерной химии, часто используются числовые характеристики, которые отражают отдельные свойства структур и не зависят от нумерации вершин [14–18]. Такие характеристики названы инвариантами. Примером инварианта является n -мерный вектор $S(G)$ с упорядоченными по возрастанию значениями степеней s_i вершин $e_i \in E_G$ графа G . Приведем пример другого инварианта $M^l(G)$, вычисляемого на основе матрицы смежности вершин графа G , возведенной в степень l . Такую матрицу обозначим $A^l(G)$, $l=2,3,\dots$. Элементы a_{ij}^l матрицы $A^l(G)$ соответствуют числу маршрутов длины l , связывающих вершины e_i и e_j . Соответственно, инвариант $M^l(G)$, полученный на основе матрицы $A^l(G)$, будем называть маршрутным. Инвариант $M^l(G)$, так же как и степенной инвариант $S(G)$, представляется в виде n -мерного вектора. Элементом вектора $M^l(G)$ является упорядоченное по возрастанию значений множество ненулевых элементов строк $A^l(G)$ матрицы $A^l(G)$. В векторе $M^l(G)$ элементы записываются в порядке возрастания значений числовых эквивалентов, полученных для соответствующих множеств.

В теории графов накоплено большое разнообразие инвариантов [7]. Известны попытки получить полный набор инвариантов, идентифицирующих структуру графа с точностью до изоморфизма. Все такие попытки, так же как и исследования по поиску видов полных инвариантов и алгоритмов их вычисления, до последнего времени оказывались безуспешными [19, 20]. Известен только один полный инвариант в виде миникода [21], но для его вычисления, как и для определения изоморфизма двух графов G и H , требуется перебор $n!$ вариантов перестановок строк и столбцов матрицы $A(G)$.

Решение такой сложной задачи, какой, несомненно, является проблема получения полного инварианта графа, как это часто и случается в научной работе, оказалось неожиданно простым и оригинальным [22–24]. В работе [24] предлагается алгоритм вычисления полных инвариантов $P(G)$ для однородных и неоднородных обыкновенных графов в виде интегрального описателя структуры (Integral Structure Descriptor – ISD). В этом случае полный инвариант $P(G)$ выступает в роли однозначного идентификатора абстрактной структуры графа G . Равенство идентификаторов $P(G)$ и $P(H)$ графов G и H означает, что они изоморфны, т. е. их абстрактные структуры совпадают.

Экспериментальные исследования алгоритма вычисления $P(G)$ в [24] выполнялись с помощью специально разработанной программы GraphISD на графах, содержащих до 1000 вершин. Результаты экспериментов, приведенных в [24], подтверждают высокую эффективность работы алгоритма. Например, для однородного графа G с числом вершин $n=1000$ и степенью $s=200$, время вычисления $P(G)$ без привлечения маршрутной характеристики (самый трудный случай) составило 63564 мс, а с применением маршрутной характеристики – 274 мс. Для неоднородных графов алгоритм работает существенно быстрее. В частности, для $n=2000$ с множеством значений степеней (100,200), генерируемых вершинам примерно в равных долях, потребовалось 410 мс, а для $n=10000$ с множеством значений степеней (100,200,300,400) – 4900 мс. Приведенные выше значения времени вычисления полного инварианта даны без учёта времени на генерацию графов.

Наличие эффективного алгоритма вычисления полного инварианта автоматически решает проблему изоморфизма графов. Этому, несомненно, можно порадоваться, но задачи анализа структур графов далеко не ограничиваются проверкой их на изоморфизм. В частности, проблема сходства структур графов для практических применений является более важной и обобщает задачу определения изоморфизма, рассматривая её как частный случай, который соответствует полному сходству графов.

Данная статья представляет первые результаты исследований по проблеме сходства структур графов с равными степенными инвариантами. В основу исследований положен метод дифференциации вершин графа. Основное внимание уделено проверке наличия полного сходства структур сравниваемых графов, что соответствует их изоморфизму. Идея метода дифференциации вершин с помощью рекуррентного правила интеграции кодов структурных различий была положена в основу разработки алгоритмов вычисления полных инвариантов [22–24]. В этих работах авторами было подмечено, что данная идея может оказаться весьма полезной при разработке методов анализа сходства структур графов. Поэтому в статье, отражающей начальную стадию исследований, основное

Вектор D^0 графа H , полученный в условиях полной дифференциации вершин на основе характеристики $M^2(H)$, принимается, в соответствии с алгоритмом [18], в качестве вектора $D(H)$, отражающего финальную стадию процесса дифференциации. Если граф H на рис. 1 представить в списке инцидентов $F(e_j)$ вершин $e_j \in E_H$ в виде $\{e_j(F(e_j))\}$, то, подставляя вместо e_j соответствующие значения кодов d_j вектора $D(H)$, получим список $\tilde{P}(H) = \{d_j(F(d_j))\}$. После упорядочения в списке $\tilde{P}(H)$ элементов $d_j(F(d_j))$ по возрастанию значений d_j получим полный инвариант $P(H) = \{d_j(F(d_j))\}$. Для нашего примера полный инвариант $P(H) = \{1(5), 2(4), 3(4,7), 4(2,3,5,6,7,8), 5(1,4,6,7,8), 6(4,5), 7(3,4,5,8), 8(4,5,7)\}$. Инвариант $P(H)$ является идентификатором или инвариантным описанием абстрактной структуры графа H с номерами вершин d_j и рёбрами, определяемыми инцидентами $F(d_j)$ вершин d_j .

Из приведенного выше примера следует, что в деле получения полного инварианта главным является достижение полной дифференциации вершин. Для решения данной задачи необходимо найти основание для различия вершин на структурном уровне. Характеристики вершин и отношений между ними в структуре графа, которые способны привести к частичной или полной дифференциации вершин будем именовать структурными различиями. Из примеров на рис. 1 следует, что значения элементов степенной и маршрутных характеристик соответствуют определению структурного различия. Степенная характеристика частично дифференцирует вершины неоднородного графа (граф H на рис. 1), а маршрутная может привести к дифференциации вершин однородного графа (граф G на рис. 1).

Для дифференциации вершин могут быть использованы и другие известные в теории графов вычисляемые характеристики. Структурные различия вершин на основе вычисляемых характеристик будем именовать базовыми. Для достижения большей дифференциации можно одновременно использовать совокупность базовых различий. Но в этом случае нельзя гарантировать достижение полной дифференциации. Чтобы продолжить дифференциацию вершин, очевидно, следует учитывать их различия в отношениях. Описать все многообразие структурных различий в отношениях, определяемых особенностями структур графов, не представляется возможным. Поэтому структурные различия такого вида будем именовать скрытыми.

Мы знаем, что скрытые различия существуют и могут быть использованы для дифференциации вершин. Например, вершины e_2 и e_4 в графе H на рис. 1 неразличимы по степенной характеристике $\tilde{S}(H)$, но e_2 связана с e_3 , у которой $s_3=4$, а у e_4 нет связи с вершиной со степенью 4. Проблема заключается в том, что для идентификации графов на основе полной дифференциации необходимо все скрытые различия описать и использовать наравне

с базовыми различиями. Решение данной проблемы будет рассмотрено в следующем разделе статьи.

Применение базовых, а затем и скрытых различий также не гарантирует достижение полной дифференциации вершин. Например, в симметричных графах не могут работать оба вида различий. Частичная дифференциация вершин, полученная после применения базовых и скрытых структурных различий, означает, что ряд вершин графа по отношению к данным базовым различиям и всем скрытым различиям, порождаемым структурой графа, оказались неразличимыми. Для дифференциации неразличимых вершин предлагается вводить дополнительное искусственное различие, которое будем именовать виртуальным.

Каждое из трех видов различий в дифференциации вершин играет свою роль. Базовые и виртуальные различия применяются для получения начальной частичной дифференциации, а скрытые – для её продолжения. Основную проблему представляют скрытые различия – отсутствие возможности их выделения и применения для дифференциации. Ниже предложен метод выполнения процесса дифференциации, в котором структура графа рассматривается как некоторая динамическая система, функционирующая в дискретном времени. В ходе функционирования такой системы интегрируется и накапливается информация о скрытых различиях относительно положения вершин в структуре графа.

Процесс дифференциации вершин на основе модели в виде динамической системы

Функционирование структуры графа как динамической системы, порождающее дифференциацию вершин на основе скрытых различий, может осуществляться только при наличии начальной частичной дифференциации. Для получения начальной дифференциации используется априорно заданная совокупность базовых различий. Такие различия должны легко вычисляться. Например, это базовые различия на основе степенных $\tilde{S}(H)$ или маршрутных $M^2(H)$ характеристик. Если с помощью этих базовых различий получить начальную дифференциацию не удается, то вводится виртуальное различие.

Начальная дифференциация вершин принимается как исходное состояние динамической системы и представляется в виде вектора $D^0 = \{d_i^0\}$, $i=1,2,\dots,n$, n – число вершин в графе. Элементы d_i^0 обозначают порядковые номера упорядоченных по возрастанию значений характеристики, используемой в качестве базового различия. Например, для графа G на рис. 1, по характеристике $M^2(G)$, вектор D^0 отражает три различия, $d_i^0=1,2,3$, а по характеристике $\tilde{S}(G)$ нет различий, и для получения вектора D^0 в граф G через вершину e_1 вводится виртуальное различие $d_1^0=2$. В графе H на рис. 1 по характеристике $\tilde{S}(H)$ вектор D^0 отражает шесть различий. При этом элементы d_i^0 вектора

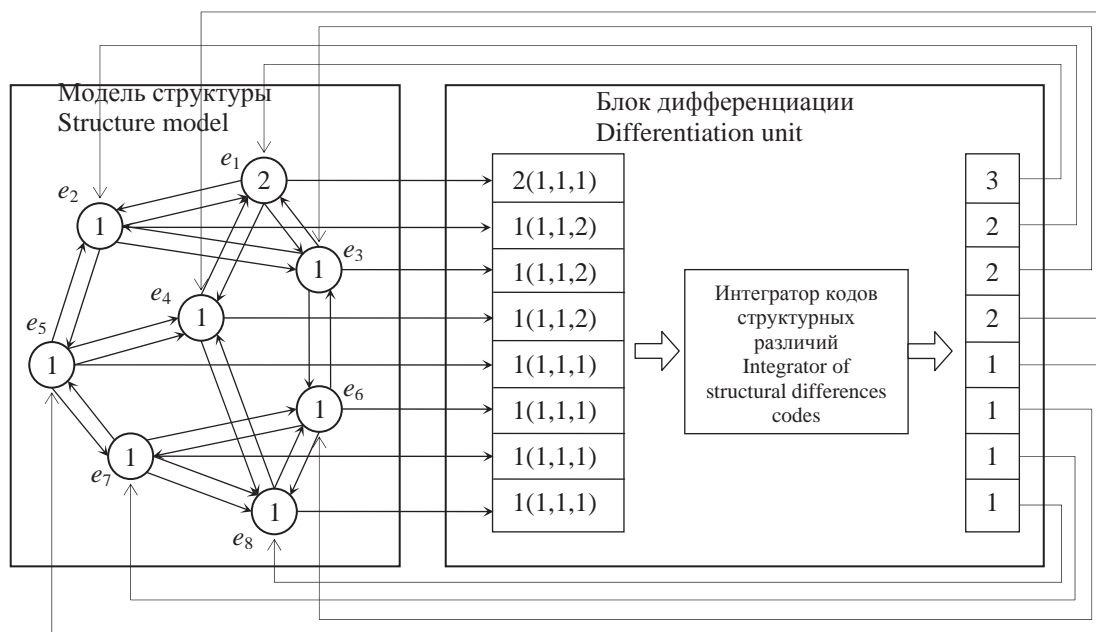


Рис. 2. Динамическая система структуры графа G

Fig. 2. Dynamic system of G graph structure

D^0 оказались равными значениям степеней s_i вершин e_i . По характеристике $\tilde{M}^2(H)$ достигнута полная дифференциация, т. е. вектор D^0 принимается в качестве конечного вектора D и запускать процесс дифференциации на динамической системе структуры графа H нет необходимости.

В динамической системе структуры графа каждая вершина соответствует автомату. Автоматы в системе взаимодействуют между собой по каналам связи, которые соответствуют рёбрам графа. Для перехода системы из одного состояния в другое все автоматы выполняют единый набор действий под управлением блока дифференциации. Пример динамической системы для дифференциации вершин графа G с вектором D^0 на основе виртуального различия приведен на рис. 2.

Динамическая система состоит из 2-х частей: автоматная модель структуры графа и блок управления процессом дифференциации. Автомат вершины e_i при переходе системы из состояния D^k в D^{k+1} последовательно выполняет следующий цикл действий:

- приём от блока управления дифференциацией состояния d_i^k ;
- передача состояния d_i^k всем автоматам вершин e_j , связанным с автоматом вершины e_i ;
- приём от автоматов вершин e_j состояний d_j^k и формирование из них упорядоченного по возрастанию значений d_j^k множества $F(d_i^k)$ – инцидентора вершины e_i с состоянием d_i^k ;
- передача в блок управления дифференциацией инцидентора $F(d_i^k)$ и состояния d_i^k в форме $d_i^k(F(d_i^k))$.

Блок управления дифференциацией организует работу динамической системы и на основе дан-

ных, полученных в результате выполнения очередного цикла действий автоматной модели, вычисляет новое состояние системы. При этом выполняются следующие операции:

- передача состояний $\{d_i^k\}$ автоматам вершин модели (при запуске процесса дифференциации автоматам передается начальное состояние $D^0 = \{d_i^0\}$);
- приём данных от автоматов модели в форме $\{d_i^k(F(d_i^k))\}$;
- вычисление нового состояния D^{k+1} на основе собранных данных $\{d_i^k(F(d_i^k))\}$ и ряда параметров, определяющих разные условия процесса дифференциации.

Функционирование динамической системы можно представить последовательностью смены состояний $D^0, D^1, \dots, D^k, \dots, D^{k^*} = D$, $k^* < n$, от начального D^0 до конечного $D^{k^*} = D$, соответствующего полной дифференциации вершин. При запуске процесса дифференциации система переводится в состояние d_i^0 . Далее автоматы обмениваются между собой состояниями d_i^0 и формируют инциденторы $F(d_i^0)$, которые в форме $d_i^0(F(d_i^0))$ передаются в блок управления. В этом блоке на основе анализа данных $\{d_i^0(F(d_i^0))\}$ определяется новое состояние системы D^1 . После этого система переводится в новое состояние D^1 вместо D^0 и цикл действий по формированию данных $\{d_i^1(F(d_i^1))\}$ повторяется. Таким образом, при функционировании динамической системы циклически происходит накопление и интеграция данных о структурных различиях и на этой основе дифференциация вершин.

В общем случае смена состояния системы $D^k \Rightarrow D^{k+1}$ осуществляется с помощью алгоритма оператора A_z , т. е. $D^{k+1} = A_z\{d_i^k(F(d_i^k))\}$. Индекс z ука-

зывает на модификацию алгоритма в зависимости от задачи, в составе которой выполняется процесс дифференциации вершин. Задача базового алгоритма A заключается в получении интегрального описателя структуры (ISD). Модификации алгоритма учитывают особенности задач, что приводит к необходимости введения дополнительных операций и изменениям правила выполнения процесса дифференциации вершин. К настоящему времени выделено 4 задачи, каждая из которых использует алгоритм получения ISD в соответствующей модификации.

1. Получение для графа G полного инварианта в условиях «свободного» назначения кодов (дескрипторов) инциденторам $d_i^k(F(d_i^k))$, отражающим структурные различия. В этом случае процесс дифференциации сопровождается запоминанием принятых кодов и оформлением их в систему кодирования $W_G(S)$. Здесь S обозначает степенной инвариант графа G , а индекс G указывает на принадлежность системы кодирования графу G . Полный инвариант графа G , полученный в условиях свободной интеграции кодов структурных различий, будем обозначать $P_w(G)$, подчеркивая зависимость такого инварианта от системы кодирования $W_G(S)$. Алгоритм вычисления полного инварианта $P_w(G)$, использующего свободную (free) интеграцию кодов, будем обозначать ISD-F.
2. Поиск в графе H полного инварианта $P_G(H)=P_w(G)$ с использованием в процессе дифференциации системы кодирования $W_G(S)$. Индекс G в обозначении $P_G(H)$ указывает на применение в процессе интеграции кодов системы кодирования $W_G(S)$, полученной для графа G . Наличие инварианта $P_G(H)=P_w(G)$ означает, что граф H изоморфен графу G . Если инвариант $P_G(H)=P_w(G)$ найти не удалось, то на основе анализа процесса интеграции и достигнутой дифференциации вершин могут быть получены некоторые оценки сходства графа G и H . При необходимости для графа H может быть получен полный инвариант $P_w(H)$ со своей системой кодирования $W_H(S)$. При поиске инварианта $P_G(H)$ применялась зависимая (dependent) от $W_G(S)$ интеграция кодов структурных различий. В соответствии с этим алгоритм поиска инварианта $P_G(H)$ назван ISD-D.
3. Вычисление для графа G полного инварианта $P(G)$ без формирования или использования какой-либо системы кодирования. В этой задаче алгоритм при дифференциации вершин использует независимую (independent) интеграцию кодов структурных различий и получил название ISD-I. Равенство полных инвариантов $P(G)$ и $P(H)$ является гарантией изоморфизма графов G и H . Пользуясь алгоритмом ISD-I, мы получаем для любого графа G полный инвариант $P(G)$, который одновременно является инвариантным описателем абстрактной структуры данного графа.

4. Решение проблемы оценивания сходства абстрактных структур графов с применением метода дифференциации вершин. В этой проблеме изоморфизм двух графов соответствует полному сходству их структур и рассматривается как частный результат, полученный при оценивании сходства. Анализ сходства структур предлагается осуществлять с помощью метода дифференциации вершин, в котором процесс интеграции кодов структурных различий в сравниваемых структурах графов производится одновременно. При этом оценивание сходства делается постоянно на основе сопоставления процессов дифференциации после очередной смены состояний динамических систем структур графов. Процессы интеграции в этом случае являются взаимозависимыми (interdependent) от структур сравниваемых графов, а соответствующая модификация алгоритма получила название ISD-ID.

Исследования по проблеме сходства структур с помощью метода дифференциации вершин на основе взаимозависимой интеграции кодов структурных различий еще предстоит выполнить. Предлагаемое в статье решение проблемы изоморфизма графов на основе дифференциации вершин, которое будет изложено в следующем разделе, следует рассматривать как начальную стадию этих исследований. Решение здесь базируется на проверке сходства процессов свободной и зависимой интеграции (задачи 1 и 2), что также соответствует целям взаимозависимой интеграции. Что касается алгоритма ISD-I вычисления полного инварианта на основе независимой интеграции (задача 3), то он подробно представлен в работе [24].

Решение проблемы изоморфизма графов

Изоморфизм двух обыкновенных графов G и H с равными степенными инвариантами $S(G)=S(H)$ легко установить, проверяя соблюдение равенства $P_w(G)=P_w(H)$ или $P(G)=P(H)$. В первом случае сравнивается полный инвариант $P_w(G)$, полученный с помощью алгоритма ISD-F, и полный инвариант $P_w(H)$, поиск которого осуществляется с помощью алгоритма ISD-D относительно системы кодирования $W_G(S)$. Во втором случае полные инварианты $P(G)$ и $P(H)$ вычисляются независимо друг от друга с помощью алгоритма ISD-I.

В алгоритме ISD-I, в отличие от ISD-F и ISD-D, нет необходимости сопоставления процессов дифференциации вершин графов G и H на предмет оценивания их сходства, т. к. здесь нет общей системы кодирования. Не исключено, что в последующем будут найдены основания и правила сопоставления процессов дифференциации и для данного алгоритма. Что касается алгоритмов ISD-F и ISD-D, то здесь процесс дифференциации выполняется относительно общей системы кодирования и для алгоритма ISD-D операции сопоставления состояний динамической системы являются обязательными. Поэтому на стадии поиска подходов к решению

проблемы сходства структур большой интерес представляют операции проверки сходства процессов дифференциации на основе свободной и зависимой интеграции, выполняемые алгоритмами ISD-F и ISD-D для установления изоморфизма графов. Заметим также, что по показателям эффективности применение данных алгоритмов для решения проблемы изоморфизма обладает рядом преимуществ в сравнении с алгоритмом ISD-I. Эти преимущества будут отмечены ниже.

По содержанию алгоритм ISD-F полностью воспроизводит работу динамической системы, представленной на рис. 2. Начальное состояние D^0 определяется на основе степенной характеристики $\hat{S}(G)$ для неоднородных графов и маршрутной характеристики $\hat{M}^c(G)$ для однородных. Если начальная дифференциация при этом не достигается, то через вершину e_1 вводится виртуальное различие $d_i^0=2$.

Рассмотрим правила вычисления нового состояния D^{k+1} на основе данных $\{d_i^k(F(d_i^k))\}$. В состоянии D^k среди кодов d_i^k , для которых еще не присвоен новый код выбираются коды d_i^k с минимальным значением d . Группу вершин e_{i^*} с выбранным кодом d обозначим E_d^k . Если $|E_d^k|=1$, то $d_i^{k+1}=d_i^k$ и выбор следующих по величине кодов повторяется. При $|E_d^k|>1$ инциденты $F(d_i^k)$ для $e_{i^*} \in E_d^k$ преобразуются в числовые эквиваленты и упорядочиваются по возрастанию значений. Вершине e_{i^*} , соответствующей минимальному из них, присваивается код $d_i^{k+1}=d$. Для всех e_{i^*} следующего по величине числового эквивалента – код $d_i^{k+1}=d+1$, затем $d+2$ и до $d+\delta$. Равным числовым эквивалентам присваиваются равные коды. Далее в состоянии D^k значения всех $d_i^k > d$ увеличиваются на δ , и процесс выбора d_i^k с минимальным значением d повторяется.

После получения нового состояния D^{k+1} алгоритм ISD-F запоминает соответствия между $d_i^k(F(d_i^k))$ и присвоенными значениями d_i^{k+1} и заносит их в систему кодирования $W_G(S)$. При достижении состояния D алгоритм ISD-F формирует полный инвариант в виде $P_W(G)=\{d_i(F(d_i))\}$.

В ходе продвижения системы от состояния D^0 к $D^{k^*}=D$ может возникнуть ситуация, когда $D^{k+1}=D^k$, т. е. очередная смена состояний не приводит к дополнительной дифференциации вершин. В этом случае состояние D^k называется устойчивым и

обозначается как D^{k^*} . Здесь индекс $v=1,2,\dots,V$ указывает на порядковый номер устойчивого состояния, возникшего на пути от D^0 к D . Группы вершин $E_d^{k^*}$ с равными значениями $d_i^{k^*}$ называются устойчивыми. Такие группы играют важную роль в теории метода ISD и достаточно подробно рассмотрены в работе [23]. Для продолжения процесса дифференциации в состоянии D^{k^*} выбирается устойчивая группа $E_d^{k^*}$ минимальной мощности и с минимальным значением d . Через одну из вершин этой группы вводится виртуальное различие с кодом, равным $\max\{d_i^{k^*}\}+1$. После этого процесс дифференциации продолжается до следующего устойчивого состояния D^{k^*+1} либо до $D^{k^*}=D$.

Результат работы алгоритма ISD-F для графа G , приятного в качестве модели на рис. 2, представлен на рис. 3. Для достижения полной дифференциации потребовалось три смены состояний. При этом все состояния оказались без устойчивых групп. Если виртуальное различие ввести через вершину e_5 , то состояние D^3 будет содержать три устойчивые группы по две вершины. Система кодирования $W_G(S)$ на рис. 3 не показана. Она содержит все соответствия между $d_i^k(F(d_i^k))$ и d_i^{k+1} . Например, $d_4^1(F(d_4^1))=2(1,1,3)$ соответствует код $d_4^2=4$.

Полный инвариант $P_W(G)=\{d_i(F(d_i))\}$, полученный для графа G на основе состояния $D(G)$, сопровождается системой кодирования $W_G(S)$ и выступает в роли эталона при проверке изоморфизма графа H графу G . Графы H и G являются изоморфными, если между процессами дифференциации вершин графа H и графа G имеет место полное сходство. В этом случае полный инвариант $P_G(H)=P_W(G)$. Поиск для графа H полного инварианта $P_G(H)=P_W(G)$ осуществляется с помощью алгоритма ISD-D. Рассмотрим отличия алгоритма ISD-D от ISD-F.

Первое отличие связано с изменением правила вычисления нового состояния D^{k+1} . Будем считать, что состояние $D^k(H)=\{d_i^k\}$ для графа H равно состоянию $D^k(G)=\{d_i^k\}$ для графа G , если между кодами d_i^k и d_i^k можно установить взаимно однозначное соответствие, при котором $d_j^k=d_i^k$. Проверку наличия такого соответствия при каждой смене состояния в процессе дифференциации вершин графа H выполняет алгоритм ISD-D. Для этого после полу-

$G = \{e_i(F(e_i))\}$	$d_i^0(F(d_i^0))$	$d_i^1(F(d_i^1))$	$d_i^2(F(d_i^2))$	$d_i^3(F(d_i^3))$	$P_W(G)$
1(2,3,4)	2(1,1,1)	3(2,2,2)	6(4,5,5)	8(5,6,7)	1(2,3,4)
2(1,3,5)	1(1,1,2)	2(1,2,3)	5(3,5,6)	7(4,6,8)	2(1,3,5)
3(1,2,6)	1(1,1,2)	2(1,2,3)	5(2,5,6)	6(3,7,8)	3(1,2,6)
4(1,5,8)	1(1,1,2)	2(1,1,3)	4(2,3,6)	5(2,4,8)	4(1,5,7)
5(2,4,7)	1(1,1,1)	1(1,2,2)	3(1,4,5)	4(1,5,7)	5(2,4,8)
6(3,7,8)	1(1,1,1)	1(1,1,2)	2(1,2,5)	3(1,2,6)	6(3,7,8)
7(5,6,8)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(2,2,3)	1(2,3,4)	7(4,6,8)
8(4,6,7)	1(1,1,1)	1(1,1,2)	2(1,2,4)	2(1,3,5)	8(5,6,7)

Рис. 3. Пример работы алгоритма ISD-F

Fig. 3. Example of ISD-F algorithm operation

чения данных $\{d_j^k(F(d_j^k))\}$ каждому элементу $d_j^k(F(d_j^k))$ ставится в соответствие элемент $d_i^k(F(d_i^k))$ из системы кодирования $W_G(S)$ и код d_i^{k+1} этого элемента присваивается коду d_j^{k+1} . Равенство состояний $D^{k+1}(H)$ и $D^{k+1}(G)$ является основанием для продолжения процесса дифференциации. Если равенства нет, то анализируется две ситуации. Одна из них соответствует завершению процесса поиска инварианта $P_G(H)=P_W(G)$. Это означает, что графы H и G неизоморфны. Вторая ситуация предусматривает продолжение поиска инварианта путем запуска нового процесса дифференциации.

Необходимость запуска нового процесса дифференциации связана с введением виртуального различия и обуславливает второе отличие алгоритма ISD-D. В алгоритме ISD-F виртуальное различие вводится в устойчивую группу $E_d^k(G)$ через произвольно выбранную вершину. Из свойств устойчивых групп известно [23], что в подстановке изоморфизма графов G и H вершины группы $E_d^k(G)$ будут соответствовать вершинам группы $E_d^k(H)$. При этом неизвестно какая из вершин e_j в группе $E_d^k(H)$ будет соответствовать выбранной в $E_d^k(G)$ вершине e_i . Поэтому при поиске инварианта $P_G(H)=P_W(G)$ приходится последовательно вводить виртуальное различие через все вершины e_j устойчивой группы $E_d^k(H)$.

Алгоритм ISD-D организует последовательный выбор вершин устойчивой группы и запуск процесса дифференциации с новым состоянием D^k . Для всех достигнутых при этом состояний D^{k+1} и равных соответствующему состоянию в системе $W_G(S)$ процессы дифференциации запускаются по-

следовательно относительно каждой вершины устойчивой группы, выбранной в состоянии D^{k+1} . В условиях, когда графы G и H являются однородными, в графе H приходится запускать процессы дифференциации после введения виртуального различия последовательно через все вершины пока не будет найден инвариант $P_G(H)=P_W(G)$, либо будет установлено, что графы G и H неизоморфны.

На рис. 4 приведен результат работы алгоритма ISD-D по установлению изоморфизма графа H графу G , для которого ранее был получен полный инвариант $P_W(G)$ (рис. 3). В качестве графа H взят граф G с измененной нумерацией вершин, т. е. граф H должен содержать полный инвариант $P_G(H)=P_W(G)$. Из рис. 4 следует, что при введении виртуального различия через вершину e_1 уже в состоянии D^1 данные $\{d_i^1(F(d_i^1))\}$ графа H не соответствуют данным $\{d_i^1(F(d_i^1))\}$ графа G . Второй запуск процесса дифференциации после введения виртуального различия через вершину e_2 привел к получению полного инварианта $P_G(H)=P_W(G)$. Абстрактная структура графов G и H , построенная по их инвариантам, приведена на рис. 4. Коды d_i , указанные внутри вершин абстрактной структуры, отражают состояние полной дифференциации. Рядом с вершинами приведены пары (e_i, e_j) , соответствующие подстановке изоморфизма графов G и H . Пары (e_i, e_j) устанавливаются на основе сопоставления данных $\{d_i^3(F(d_i^3))\}$ (рис. 3) и $\{d_j^3(F(d_j^3))\}$ (рис. 4).

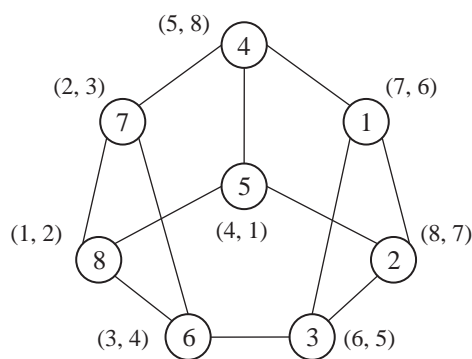
Решение проблемы изоморфизма с помощью алгоритмов ISD-F и ISD-D по сравнению с алгоритмом ISD-I обладает рядом преимуществ:

$H=\{e_j(F(e_j))\}$	$d_j^0(F(d_j^0))$	$d_j^1(F(d_j^1))$	d_j^2
1(2,7,8)	2(1,1,1)	3(2,2,2)	6
2(1,3,4)	1(1,1,2)	2(1,1,3)	4
3(2,4,8)	1(1,1,1)	2(1,2,2)	3
4(2,3,5)	1(1,1,1)	2(1,1,2)	2
5(4,6,7)	1(1,1,1)	2(1,1,2)	2
6(5,7,8)	1(1,1,1)	2(1,2,2)	?
7(1,5,6)	1(1,1,2)	2(1,1,3)	?
8(1,3,6)	1(1,1,2)	2(1,1,3)	?

$H=\{e_j(F(e_j))\}$	$d_j^0(F(d_j^0))$	$d_j^1(F(d_j^1))$	$d_j^2(F(d_j^2))$	$d_j^3(F(d_j^3))$	$P_G(H)$	(e_i, e_j)
1(2,7,8)	1(1,1,2)	2(1,1,3)	4(2,3,6)	5(2,4,8)	1(2,3,4)	(7, 6)
2(1,3,4)	2(1,1,1)	3(2,2,2)	6(4,5,5)	8(5,6,7)	2(1,3,5)	(8, 7)
3(2,4,8)	1(1,1,2)	2(1,2,3)	5(3,5,6)	7(4,6,8)	3(1,2,6)	(6, 5)
4(2,3,5)	1(1,1,2)	2(1,2,3)	5(2,5,6)	6(3,7,8)	4(1,5,7)	(5, 8)
5(4,6,7)	1(1,1,1)	1(1,1,2)	2(1,2,5)	3(1,2,6)	5(2,4,8)	(4, 1)
6(5,7,8)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(2,2,3)	1(2,3,4)	6(3,7,8)	(3, 4)
7(1,5,6)	1(1,1,1)	1(1,1,2)	2(1,2,4)	2(1,3,5)	7(4,6,8)	(2, 3)
8(1,3,6)	1(1,1,1)	1(1,2,2)	3(1,4,5)	4(1,5,7)	8(5,6,7)	(1, 2)

Рис. 4. Пример работы алгоритма ISD-D

Fig. 4. Example of ISD-D algorithm operation



1. Объём вычислений, требуемый для получения инварианта $P_w(G)$, существенно меньше, чем для получения инварианта $P(G)$. Это особенно ощутимо для однородных графов. В этом случае алгоритму ISD-I приходится делать попытку получить начальную дифференциацию с помощью маршрутной характеристики $M^2(G)$ или вводить виртуальное различие, при котором процесс дифференциации запускается n раз, а в алгоритме ISD-F – один раз.
2. Процесс проверки изоморфизма графов G и H заканчивается, как только алгоритму ISD-D в графе H удаётся найти инвариант $P_G(H)=P_w(G)$. По объёму вычислений алгоритм ISD-D сравним с алгоритмом ISD-I лишь в условиях, когда требуется выполнять поиск в графе H всех других инвариантов $P_G(H)=P_w(G)$.
3. Основным преимуществом, о котором уже упоминалось ранее, является возможность сопоставлять процессы дифференциации и оценивать сходство структур неизоморфных графов. Проверка изоморфных графов здесь рассматривается как частный результат оценивания сходства структур. Разработка методов оценивания на основе сопоставления процессов дифференциации вершин является предметом отдельных исследований. Некоторые соображения по этой проблеме были приведены при характеристике 4-й задачи в предыдущем разделе. Решение проблемы оценивания сходства структур авторы связывают с дальнейшим развитием концепции сопоставления процессов дифференциации и разработкой методов взаимозависимой интеграции кодов структурных различий под конкретные задачи оценивания сходства структур.

Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования алгоритмов проводились с помощью программы GraphISD, написанной на языке C++, на компьютере, со следующими характеристиками: Intel Core i7–4770 3,40 GHz, 16 GB RAM. Программа включает возможность генерации графов G с заданными степенными инвариантами $S(G)$ и перенумерации у них вершин для получения графов G^* изоморфных графам G . Начальное состояние D^0 для неоднородного графа формируется на основе степенной характеристики $\check{S}(G)$. Для однородного графа – на основе маршрутной характеристики $\check{M}^2(G)$ либо путем введения виртуального различия. Генерируемый граф задается числом вершин n , значением степени s для однородного графа, значениями (s_1, s_2, \dots) для неоднородного графа. При этом вершины с разными степенями генерируются примерно в равных долях.

Эксперименты проводились с графами, содержащими до 5000 вершин. Связность графов не контролировалась, т. е. могли встречаться и несвязные графы. Результаты экспериментов, отражающие время работы алгоритмов в миллисекун-

дах, сведены в таблицу. Для каждого значения n генерировалось два графа – однородный G_1 со степенью s и неоднородный G_2 со степенями s_1, s_2 .

Таблица. Результаты экспериментов

Table. Experimental results

n	G_1		G_2		ISD-F		ISD-D		ISD-D		ISD-I		$\tau(A^2)$
	s	s_1, s_2	$P_w(G_1)$	$P_w(G_2)$	$P_G(G_1)$	$P_G(G_2)$	$P_G(H_1)$	$P_G(H_2)$	$P_G(H_1)$	$P_G(H_2)$	$P(G_1)$	$P(G_2)$	
50	5	5,10	1	0	1	0	1	1	1	1	6	4	0
100	5	5,10	1	0	1	1	1	1	1	1	7	6	0
200	10	10,20	2	1	2	1	2	1	2	1	8	6	0
400	10	10,20	8	2	9	2	9	2	9	2	15	7	4
600	15	15,30	25	3	26	3	27	3	27	3	44	10	25
800	15	15,30	50	5	53	5	49	6	57	15	57	15	35
1000	15	15,30	87	7	88	7	87	6	110	16	75	16	75
1500	15	15,30	241	12	245	14	245	10	344	25	216	25	216
2000	20	20,40	519	20	570	24	516	19	645	36	502	36	502
2500	20	20,40	938	30	958	34	1042	27	1052	41	914	41	914
3000	30	30,60	1708	46	1740	52	1704	40	1764	64	1612	64	1612
5000	30	30,60	7386	104	7526	124	7695	95	7674	131	7520	131	7520

Алгоритм ISD-F для графов G_1 и G_2 вычисляет полные инварианты $P_w(G_1)$ и $P_w(G_2)$. Время работы алгоритма указано в соответствующих столбцах таблицы. При этом для однородного графа G_1 начальное состояние D^0 формировалось на основе маршрутной характеристики $M^2(G_1)$. При этом начальная дифференциация достигалась всегда и, следовательно, потребность введения виртуального различия не возникала. Время возведения матрицы в квадрат при вычислении маршрутной характеристики в таблице обозначено $\tau(A^2)$.

Работа алгоритма ISD-D представлена в таблице двумя экспериментами. Первый из них отражает работу алгоритма с графами G_1^* и G_2^* , полученными в результате перенумерации вершин в графах G_1 и G_2 . Изоморфизм графов в парах (G_1, G_1^*) и (G_2, G_2^*) алгоритм подтверждает, выполняя поиск полных инвариантов $P_{G_1}(G_1^*)=P_w(G_1)$ и $P_{G_2}(G_2^*)=P_w(G_2)$. Затраты времени на проверку изоморфизма приведены в соответствующих столбцах таблицы. Для проведения второго эксперимента используются графы H_1 и H_2 , которые генерируются заново с тем же значением n и степенями, что и у графов G_1 и G_2 . В таблице приведены времена, затрачиваемые алгоритмом ISD-D на подтверждение того, что графы в парах (G_1, H_1) и (G_2, H_2) неизоморфны, т. е. $P_{G_1}(H_1) \neq P_w(G_1)$ и $P_{G_2}(H_2) \neq P_w(G_2)$. Заметим, что в ходе экспериментов не было случаев, когда графы в этих парах оказывались изоморфными.

В таблице приведены также затраты времени на вычисление полных инвариантов $P(G_1)$ и $P(G_2)$ с помощью алгоритма ISD-I. В общем случае при наличии полного инварианта $P(G)$ графа G проверка на изоморфизм графов G и H сводится к вычислению полного инварианта $P(H)$ и сравнения его с $P(G)$. Поэтому затраты времени на вычисление $P(H)$ можно рассматривать как затраты на определение изоморфизма двух графов с помощью алго-

ритма ISD-I. В нашем эксперименте время вычисления $P(G_1)$ можно сравнивать с временем вычисления $P_{G_1}(G_1^*)$ или с $P_{G_1}(H_1)$, а время вычисления $P(G_2)$, соответственно, с $P_{G_2}(G_2^*)$ или с $P_{G_2}(H_2)$. Из таблицы следует, что такое сравнение складывается не в пользу алгоритма ISD-I. Это отмечалось и ранее, когда перечислялись преимущества алгоритмов ISD-F и ISD-D при проверке графов на изоморфизм.

Сравнивая алгоритмы ISD-I и ISD-F, ISD-D, следует помнить о принципиальном отличии полного инварианта $P(G)$ от $P_w(G)$. Полный инвариант $P_G(H)$ здесь не рассматривается, т. к. он дублирует $P_w(G)$ и выделяется лишь при условии $P_G(H)=P_w(G)$, когда граф H изоморфен графу G . Полный инвариант $P(G)$, в отличие от $P_w(G)$, является глобальным идентификатором структуры графа G . В то время как $P_w(G)$ может рассматриваться лишь в паре с системой кодирования $W_G(S)$, которая выступает в качестве эталона для графов изоморфных графу G . Пара $P_w(G)$, $W_G(S)$ отражает один из возможных маршрутов процесса дифференциации вершин графа G , выполняемой алгоритмом ISD-F. При этом разные пользователи для одного и того же графа G могут получить разные пары $P_w(G)$, $W_G(S)$.

Отличия в применении полных инвариантов $P(G)$ и $P_w(G)$ для проверки изоморфизма поясним на примере решения следующей задачи. Задано множество графов $\{G_q\}$, $q=1,2,\dots,Q$ с равными степенными инвариантами. Требуется разбить это множество на подмножества изоморфных графов. Решение данной задачи с помощью алгоритма ISD-I сводится к вычислению полных инвариантов $P(G_q)$ для всех графов G_q множества и распределения их по подмножествам с равными $P(G_q)$. Для алгоритмов ISD-F и ISD-D задача решается несколько сложнее. Сначала для графа G_1 вычисляется $P_w(G_1)$ и $W_{G_1}(S)$. Далее для графа G_2 делается попытка найти $P_{G_1}(G_2)=P_w(G_1)$. Если это удастся, то графы G_1 и G_2 изоморфны и они включаются в одно подмножество. Если нет, то для графа G_2 вычисляется $P_w(G_2)$ и $W_{G_2}(S)$. Для графа G_3 в зависимости от ситуации проверку на изоморфизм приходится делать по отношению к $W_{G_1}(S)$ и $W_{G_2}(S)$. В общем случае для очередного графа G_q проверку на изоморфизм следует делать по отношению к сформированным ранее $W_G(S)$. В результате граф G_q войдет в одно из подмножеств либо станет эталоном для нового подмножества с системой кодирования $W_{G_q}(S)$.

На примере данной задачи очевидны преимущества алгоритма ISD-I при работе с библиотеками графов. В качестве библиотеки графов можно рас-

сматривать, например, множество известных молекулярных структур химических соединений [1–4]. Перед включением очередного графа G в библиотеку необходимо проверить, не является ли он одним из графов, включенных ранее. Для этого достаточно вычислить полный инвариант $P(G)$ и сравнить его с инвариантами графов библиотеки. Что касается алгоритмов ISD-F и ISD-D, то они могут сыграть важную роль в исследованиях по решению проблем оценивания сходства структур графов.

Заключение

В традиционных подходах к анализу структурных свойств систем используются модели в виде графов. В данной статье мы имеем обратную задачу – необходимо анализировать структурные свойства структуры графа. Для решения этой задачи весьма многообещающим оказалось представление модели структуры графа в виде динамической системы. Модель включает сеть автоматов, отражающую структуру графа, и блок дифференциации вершин, реализующий правила переходов автоматов из одного состояния в другое. В процессе функционирования такой системы автоматы накапливают (интегрируют) информацию об отношениях между структурными различиями в графе. В итоге автоматы приобретают разные состояния, что соответствует дифференциации вершин.

На основе данной модели разработан алгоритм вычисления инвариантного описателя структуры (ISD) в модификации F – свободная интеграция, D – зависимая интеграция, I – независимая интеграция. Алгоритмы F и D решают проблему изоморфизма графов, оценивая совпадения траекторий смены состояний сети автоматов у сравниваемых графов. Алгоритм I вычисляет полный инвариант графа, и для установления изоморфизма графов достаточно сравнить их полные инварианты.

Таким образом, проблема изоморфизма легко решается как с помощью алгоритмов F и D, так и путем сравнения полных инвариантов, вычисленных по алгоритму I. Об этом свидетельствуют результаты экспериментальных исследований.

Что касается проблемы сходства структур, то заметные продвижения в её решении авторы связывают с анализом траекторий смены состояний сетей автоматов для сравниваемых структур и оцениванием их сходства.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скворцова М.И. Математические модели и алгоритмы в исследованиях связи между структурой и свойствами органических соединений: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М., 2007. – 38 с.
2. Кинг Р.Б. Химические приложения топологии и теории графов. – М.: Мир, 1987. – 560 с.
3. Baskin I., Skvortsova M. On the Basis of Invariants of Labeled Molecular Graphs // Chem. Inf. Comput. Sci. – 1995. – V. 35. – № 3. – P. 527–531.
4. Varmuza K. Chemometrics in Practical Applications. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – 326 p.
5. Кузнецов В.Г. Графовая модель системы энергосберегающих мероприятий // ВЕЖПТ. – 2013. – № 8 (63). URL: <http://cyberleninka.ru>

- berleninka.ru/article/n/grafovaya-model-sistemy-energoberegayuschih-meropriyatiy (дата обращения: 01.11.2014).
6. Pande A., Gupta M., Tripathi A.K. Design pattern mining for GIS application using graph matching techniques // Computer Science and Information Technology (ICCSIT): 3rd IEEE International Conference. – 2010, 9–11 July. – V. 3. – P. 477–482. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5564518&isnumber=5563521> (дата обращения: 01.11.2014).
 7. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.
 8. Пролубников А.В. О новом полном инварианте ациклических графов // ПДМ. Приложение. – 2010. – № 3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/o-novom-polnom-invariante-atsiklicheskih-grafov> (дата обращения: 04.11.2014).
 9. Lindell S.A. Logspace Algorithm for Tree Canonization // Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing. – New York, 1992. – P. 400–404.
 10. Planar Graph Isomorphism is in Log-Space. 24th Annual IEEE Conference on Computational Complexity / S. Datta, N. Limaye, P. Nimbhorkar, T. Thierauf, F. Wagner. – Paris, 15–18 July, 2009. – P. 203–214.
 11. Пономаренко И.Н. Проблема изоморфизма графов: Алгоритмические аспекты (Записки к лекциям). Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова. Октябрь-декабрь 2010. URL: http://logic.pdmi.ras.ru/csclub/sites/default/files/graph_isomorphism_ponomarenko_lecture_notes.pdf (дата обращения 04.11.2014).
 12. Trofimov M.I. Polynomial Time Algorithm for Graph Isomorphism Testing. – 18 Jun 2013. URL: <http://arxiv.org/pdf/1004.1808v6.pdf> (дата обращения 04.11.2014).
 13. Вильховский Д.Э., Ефимов С.С. Исследование алгоритмов определения изоморфности графов в системах с распределённой и общей памятью // Математические структуры и моделирование. – 2012. – Вып. 26. – С. 89–93.
 14. Новый функционал информативности для анализа структуры химических графов / М. Дэмер, Ф. Эммерт-Штрайб, Ю.П. Цой, К. Вармуза // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 5–11.
 15. Quantum Frontiers of Atoms and Molecules / M. Dehmer, F. Emmert-Streib, R.Y. Tsoy, K. Varmuza. – New York: Nova Publishing, 2011. – 673 p.
 16. Emmert-Streib F., Dehmer M. Networks for systems biology: conceptual connection of data and function // IET Systems Biology. – 2011. – V. 5. – № 3. – P. 185–207.
 17. Dehmer M., Grabner M. The Discrimination Power of Molecular Identification Numbers Revisited // MATCH Commun. Math. Comput. Chem. – 2013. – V. 69. – № 3. – P. 785–794.
 18. De Matos S., Dehmer M., Emmert-Streib F. Interfacing cellular networks of *S. cerevisiae* and *E. coli*: Connecting dynamic and genetic information // BMC Genomics. – 2013. – V. 14. – № 324. – P. 111–134.
 19. An efficient heuristic approach to detecting graph isomorphism based on combinations of highly discriminating invariants / M. Dehmer, M. Grabner, A. Mowshowitz, F. Emmert-Streib // Advances in Computational Mathematics. – 2013. – V. 39. – № 2. – P. 311–325.
 20. McKay B.D., Piperno A. Practical Graph Isomorphism // J. Symbolic Computation. – January 2014. – V. 60. – P. 94–112.
 21. Balasubramanian K., Parthasarathy K.R. In search of a complete invariant for graphs // Lect. Notes Math. – 1981. – V. 885. – P. 42–59.
 22. Погребной В.К., Погребной Ан.В. Полиномиальный алгоритм вычисления полного инварианта графа на основе интегрального описателя структуры // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 152–159.
 23. Погребной В.К., Погребной Ан.В. Исследование полиномиальности метода вычисления интегрального описателя структуры графа // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 146–151.
 24. Погребной Ан.В. Полный инвариант графа и алгоритм его вычисления // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 5. – С. 110–122.

Поступила 06.11.2014 г.

UDC 519.171.1

METHOD OF GRAPH VERTICES DIFFERENTIATION AND SOLUTION OF THE ISOMORPHISM PROBLEM

Andrey V. Pogrebnoy,

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

Vladimir K. Pogrebnoy,

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

Modelling the relations between the structure of the object and its properties is one of the current problems in the modern applied graph theory. The problem of identification and evaluation of structures similarity plays the important role in solving this task. The known approaches to the structures similarity estimation in power engineering, geographic information systems, computer chemistry, including petrochemistry, are limited by using a set of indirect properties and do not consider the possibility of solving the structures similarity problem with the help of direct properties, associated with isomorphism.

The main aim of the study is to state the theoretical bases of graph vertices differentiation method and to show the method possible applications for estimating the structures similarity and for solving the isomorphism problem, considering it as a special case of complete structures similarity.

The methods used in the study are based on the applied graph theory, efficient algorithms analysis and construction theory, simulating structures using automata models and application of theory of integration of codes of structural differences.

The results. The authors have stated the problem of graph structure identification, which unites invariant description, complete invariant, graph isomorphism and structures similarity problems. It is shown that the solution of these problems is reduced in general to solving vertices differentiation problem. The paper introduces three types of structural differences in a graph – basic, hidden and virtual. The authors offered a graph structure automata model as the basis of the vertices differentiation method and development of complete graph invariant computation algorithms with free (algorithm ISD-F), dependent (ISD-D) and independent (ISD-I) integration of structure differences codes. The paper considers the features of these algorithms application for solving the isomorphism problem and the possibility of developing the algorithm for evaluating the structures similarity based on the interdependent codes integration. The authors carried out the experimental studies of algorithms for computing complete invariant for graphs containing up to 5000 vertices. The experiments have shown high efficiency of these algorithms.

Key words:

Graph structure identification, complete graph invariant, graph isomorphism, integral structure descriptor, structure automata model, graph vertices differentiation.

The research was carried out within the state task «Nauka».

REFERENCES

1. Skvorcova M.I. *Matematicheskie modeli i algoritmy v issledovaniiakh svyazi mezhdu strukturoy i svoystvami organicheskikh soedineniy. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk* [Mathematical models and algorithms in research of connection between structure and properties of organic compounds. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2007. 38 p.
2. King R.B. *Khimicheskie prilozheniya topologii i teorii grafov* [Chemical applications of graphs topology and theory]. Moscow, Mir Publ., 1987. 560 p.
3. Baskin I., Skvortsova M. On the Basis of Invariants of Labeled Molecular Graphs. *Chem. Inf. Comput. Sci.*, 1995, vol. 35, no. 3, pp. 527–531.
4. Varmuza K. *Chemometrics in Practical Applications*. Rijeka, Croatia, InTech, 2012. 326 p.
5. Kuznetsov V.G. Grafovaya model sistemy energosberegashchikh meropriyatii [Graph model of energy-saving measures]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, vol. 63, no. 8. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/grafovaya-model-sistemy-energoberegayuschih-meropriyatii> (accessed 01 November 2014).
6. Pande A., Gupta M., Tripathi A.K. Design pattern mining for GIS application using graph matching techniques. *Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*. 3rd IEEE International Conference, 2010, 9–11 July, vol. 3, pp. 477–482. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5564518&isnumber=5563521> (accessed 01 November 2014).
7. Zykov A.A. *Osnovy teorii grafov* [Basics of the graph theory]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2004. 664 p.
8. Prolubnikov A.V. O novom polnom ivariante atsiklicheskikh grafov [On a new complete acyclic graph invariant]. *PDM. Prilozhenie*, 2010, no. 3. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/o-novom-polnom-invariante-atsiklicheskikh-grafov> (accessed 14 November 2014).
9. Lindell S.A. Logspace Algorithm for Tree Canonization. *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*. New York, 1992. pp. 400–404.
10. Datta S., Limaye N., Nimbhorkar P., Thierauf T., Wagner F. Planar Graph Isomorphism is in Log-Space. *24th Annual IEEE Conference on Computational Complexity*. Paris, 15–18 July, 2009. pp. 203–214.
11. Ponomarenko I.N. *Problema izomorfizma grafov: Algoritmicheskie aspekty (Zapiski k lekciiyam)* [Problem of graph isomorphism: Algorithmic aspects (Lecture notes)]. St. Petersburg Department of Steklov Mathematical Institute RAS. October–December 2010. Available at: http://logic.pdmi.ras.ru/csclub/sites/default/files/graph_isomorphism_ponomarenko_lecture_notes.pdf (accessed 04 November 2014).
12. Trofimov M.I. *Polynomial Time Algorithm for Graph Isomorphism Testing*. 18 June 2013. Available at: <http://arxiv.org/pdf/1004.1808v6.pdf> (accessed 04 November 2014).
13. Vilkhovskiy D.E., Efimov S.S. Issledovanie algoritmov opredeleniya izomorfnosti grafov v sistemakh s raspredelennoy i obshchey pamatyu [Research of graph isomorphism determination algorithms in the systems with distributed memory]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2012, vol. 26, pp. 89–93.
14. Demer M., Emmert-Shtrayb F., Tsoy Yu.P., Varmuza K. Noviy funkcional informativnosti dlya analiza struktury khimicheskikh grafov [New informative functional for chemical graph structure analysis]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 5, pp. 5–11.
15. Dehmer M., Emmert-Streib F., Tsoy R.Y., Varmuza K. *Quantum Frontiers of Atoms and Molecules*. New York, Nova Publishing, 2011. 673 p.
16. Emmert-Streib F., Dehmer M. Networks for systems biology: conceptual connection of data and function. *IET Systems Biology*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 185–207.
17. Dehmer M., Grabner M. The Discrimination Power of Molecular Identification Numbers Revisited. *MATCH Commun. Math. Comput. Chem.*, 2013, vol. 69, no. 3, pp. 785–794.
18. De Matos S., Dehmer M., Emmert-Streib F. Interfacing cellular networks of *S. cerevisiae* and *E. coli*: Connecting dynamic and genetic information. *BMC Genomics*. 2013, vol. 14, no. 324, pp. 111–134.
19. Dehmer M., Grabner M., Mowshowitz A., Emmert-Streib F. An efficient heuristic approach to detecting graph isomorphism based on combinations of highly discriminating invariants. *Advances in Computational Mathematics*, 2013, vol. 39, no. 2, pp. 311–325.
20. McKay B.D., Piperno A. Practical Graph Isomorphism. *J. Symbolic Computation*, January 2014, vol. 60, pp. 94–112.
21. Balasubramanian K., Parthasarathy K.R. In search of a complete invariant for graphs. *Lect. Notes Math.*, 1981, vol. 885, pp. 42–59.
22. Pogrebnoy V.K., Pogrebnoy An.V. Polinomialny algoritm vychisleniya polnogo invarianta grafa na osnove integralnogo opisatelya struktury [Polynomial algorithm of complete graph invariant computation on the basis of integral structure descriptor]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 152–159.
23. Pogrebnoy V.K., Pogrebnoy An.V. Issledovanie polinomialnosti metoda vychisleniya integralnogo opisatelya struktury grafa [Research of the integral structure descriptor computation method polynomiality]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 146–151.
24. Pogrebnoy An.V. Polniy invariant grafa i algoritm ego vychisleniya [Complete graph invariant and algorithm of its computation]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 110–122.

Received: 06 November 2014.

УДК 665.613:543.631:(543.57+543.54+543.51)

СОСТАВ «СВЯЗАННЫХ» СОЕДИНЕНИЙ В МАСЛАХ БИОДЕГРАДИРОВАННЫХ НЕФТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ «ON-LINE» ФЛЭШ-ПИРОЛИЗА

Антипенко Владимир Родионович,

д-р хим. наук, проф., ведущ. науч. сотр. лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: avr@ipc.tsc.ru

Баканова Ольга Сергеевна,

аспирант лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: olgapushkar@mail.ru

Меленевский Василий Николаевич,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3. E-mail: vmelenevsky@yandex.ru

Ельчанинова Елена Александровна,

канд. хим. наук, мл. науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; доцент каф. геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: helene_tom@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения и обобщения информации о составе и строении масляных и смолисто-асфальтеновых компонентов нетрадиционных источников углеводородного сырья – тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов, большинство из которых являются биодegradированными, для выявления путей их генезиса, решения проблем добычи, транспортировки, переработки, а также рационального использования полученных продуктов. Трудности получения информации даже о составе масел перечисленных объектов, в частности, методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором (ГХ-МС) обусловлены тем, что в хроматограммах, наряду с пиками идентифицируемых соединений, присутствует так называемый «горб», в котором сосредоточено до 90...95 % компонентов масел. Состав компонентов «горба» не поддается идентификации традиционным вариантом ГХ-МС. Кроме того, опубликованные литературные данные указывают на наличие в маслах сложных высокомолекулярных компонентов, в которых некоторые типы соединений находятся в виде химически связанных между собой структурных фрагментов. А также свидетельствуют о перспективности использования деструктивных методов для получения сведений о строении «связанных» фрагментов компонентов масел.

Цель работы: получение информации о составе и строении структурных фрагментов, находящихся в сложных высокомолекулярных компонентах масел биодegradированных нефтей и природных битумов в «связанном» виде.

Методы исследования: методы ЯМР ^1H и хроматомасс-спектрометрии (ГХ-МС), аналитический пиролиз масел в вариантах Rock-Eval и сочетания двухступенчатого флэш-пиролиза при 300 и 600 °С с ГХ-МС анализом летучих продуктов термической деструкции в режиме «on-line».

Результаты. Термический крекинг компонентов масел биодegradированных нефтей и природных битумов в условиях двухступенчатого «on-line» флэш-пиролиза позволяет получить дополнительную информацию о составе нефтяных масел, которая недоступна при их прямом ГХ-МС-анализе. Полученные результаты свидетельствуют о наличии «связанных» форм алканов, алкилциклогексанов, гомогепанов и алкилбензотиофенов в составе высокомолекулярных компонентов изученных масел.

Ключевые слова:

Биодegradированные нефти, природный битум, масла, аналитический пиролиз, «связанные» соединения, состав.

Введение

Информация о составе компонентов (масел, смол и асфальтенов) тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов, большинство из которых являются биодegradированными, необходима для выявления путей их генезиса [1], решения проблем их добычи, транспортировки, переработки и рационального использования, в частности,

при производстве смазочных масел [1]. Для перечисленных объектов даже анализ масел методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором (ГХ-МС) дает ограниченную информацию. Это обусловлено тем, что в хроматограммах, наряду с пиками идентифицируемых соединений, присутствует так называемый «горб», в котором сосредоточено до 90...95 % компонентов

масел. Состав этих соединений, названных в [2–5] «неразделяемая сложная смесь», не поддается идентификации традиционным вариантом ГХ-МС. Некоторый прогресс в изучении состава компонентов «неразделяемой сложной смеси» был достигнут при использовании более эффективных вариантов ГХ-МС. В частности, сочетанием двухмерной газовой хроматографии с времяпролетным масс-спектрометром в качестве детектора [6–9]. В то же время даже такая современная техника не даёт возможности получить информацию о составе сложных высокомолекулярных компонентов нефтяных масел, содержащих, как это предполагается в [5], химически связанные формы некоторых соединений. Использование селективных химических реакций для разрыва сульфидных и эфирных мостиков в компонентах масел природного битума Ашальчинского месторождения с последующим анализом полученных продуктов позволило установить [10], что алкилтриметилбензолы, алкилциклогексаны, хейлтанты, гопаны и фенантрены присутствуют в маслах Ашальчинского природного битума не только в молекулярной форме, но и в виде химически связанных структурных фрагментов в составе сложных высокомолекулярных компонентов. Отдельные структурные фрагменты в таких компонентах масел могут быть связаны не только через сульфидные и эфирные мостики, но и полиметиленовыми мостиками. В [11, 12] установлено заметное изменение относительного содержания и состава гопанов, алкилбензолов, нафталинов, дибензотиофенов в летучих продуктах флэш-пиролиза масел природного асфальтита Ивановского месторождения при изменении температуры пиролиза от 400 до 650 °С. Эти результаты указывают на наличие в маслах изученного асфальтита высокомолекулярных компонентов, в которых перечисленные типы соединений находятся в виде структурных фрагментов в химически связанной форме. Представленная информация также свидетельствует о перспективности использования методов химической и термической деструкции для получения сведений о строении «связанных» фрагментов высокомолекулярных компонентов масел. В самом деле, сопоставительный анализ методом ГХ-МС состава соединений в исходных маслах и продуктах их пиролиза при температурах, соответствующих термической деструкции лабильных (S–S, C–S) и прочных (C–O, C–C) химических связей, может дать информацию о химической природе структурных фрагментов, находящихся в составе сложных высокомолекулярных компонентов масел в химически связанном виде.

Целью настоящей работы является получение информации о составе и строении структурных фрагментов, находящихся в сложных высокомолекулярных компонентах масел биодegradированных нефтей и природных битумов в химически связанном виде.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны масла природного битума Ашальчинского месторождения (МАБ), масла нефти Ай-Яунского месторождения (МАЯН), а также масла нефти Вахского месторождения, подвергнутой глубокой биодegradации в лабораторных условиях [13] (МВБН).

Вахское нефтяное месторождение расположено в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на территории Васюганской нефтегазоносной области [14]. Исходная нефть Вахского месторождения по данным [13] отобрана из отложенной верхней юры с глубины 2235 м, по своим характеристикам [13, 15] легкая (0,849 г/см³), со сравнительно невысоким содержанием смолисто-асфальтеновых веществ (10,1 мас. %), малосернистая (0,4 мас. %). Характеризуется высоким выходом фракций с температурой кипения до 200 (29 %) и 300 °С (50 %). Лабораторная биодegradация вахской нефти осуществлялась [13] аборигенной пластовой микрофлорой, для стимуляции которой на 100 г пластовой воды вносили 2 см³ 10%-го раствора нефтевытесняющей композиции ПАВ в составе (г/дм³): неонол АФ₉₋₁₂ – 4,0, аммиачная селитра – 32,0, карбамид – 64,0, вода – 900.

Ай-Яунское нефтяное месторождение расположено в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на территории Каймысовской нефтегазоносной области [14]. Нефть отобрана из отложений сеномана (пласт ПК₁) с глубин 1030...1035 м. Нефть по данным [14, 16, 17] характеризуется аномально высокой плотностью (0,957 г/см³ [16], 0,968 г/см³ [17]), высоким суммарным содержанием смолисто-асфальтеновых веществ (27,0 мас. % [17]), является сернистой (1,54 мас. % [16], 1,70 мас. % [17]). Фракции с температурой кипения до 200 °С отсутствуют. Суммарное содержание фракций, выкипающих до 300 °С, по разным данным составляет 6,6 [14] или 4,0 % [17].

Ашальчинское нефтебитумное месторождение расположено в пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции на западном склоне Южно-Татарского свода [1]. Образец отобран из пермских отложений с глубины 82 м. Он, по данным [1], является высокосернистым (4,67 мас. %), характеризуется высокой плотностью (0,978 г/см³), высоким суммарным содержанием смолисто-асфальтеновых веществ (36,9 мас. %), что позволяет, согласно классификации [18], отнести его к природному битуму класса мальт. Фракции с температурой кипения до 200 °С отсутствуют. По классификации [19] обе нефти и природный битум относятся к химическому типу B² или B¹. Что подтверждает факт их биодegradации в пластовых или лабораторных условиях.

Масла выделены из нефтей и мальты по методике, представленной в [20]. Методика включает осаждение асфальтенов 40-кратным избытком гекса-

на, последующее разделение деасфальтенизата адсорбционной хроматографией на силикагеле на масла, элюированные смесью гексана и бензола (70:30 по объему) и смолы, элюированные смесью этанола и бензола (50:50 по объему).

Исходные МАБ, МАЯН, МВБН были проанализированы с помощью методов ЯМР ^1H -спектроскопии и ГХ-МС. Спектры ЯМР ^1H регистрировали с помощью ЯМР-Фурье спектрометра AVANCE AV 300 фирмы «Bruker» при 300 МГц в растворах CDCl_3 . В качестве стандарта использовали тетраметилсилан. Относительное содержание протонов в различных структурных фрагментах рассчитано исходя из площади сигналов в соответствующих областях спектра: для H_{ar} – (6,6...8,5 м.д.), H_α – (2,2...4,0 м.д.), H_β – (1,1...2,1 м.д.), H_γ – (0,3...1,1 м.д.) [21]. Где H_{ar} – доля протонов, содержащихся в ароматических структурах; H_α – доля протонов у атома углерода в α -положении алифатических заместителей ароматических структур; H_β и H_γ – доля протонов в метиленовых и в концевых метильных группах алифатических фрагментов молекул, соответственно.

ГХ-МС-анализ проводили с использованием масс-спектрометра высокого разрешения DFS, TermoElectron. В газовом хроматографе использовали кварцевую капиллярную колонку TR5MS длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм. Хроматографирование проводили в режиме программированного подъема температуры от 80 до 300 °С со скоростью 4 град/мин и затем в течение 30 мин при конечной температуре. Газ носитель – гелий. Сканирование масс-спектров веществ, элюированных из колонки, осуществлялось каждую секунду в диапазоне масс до 500 а.е.м. Реконструкцию молекулярно-массового распределения различных типов соединений проводили с использованием характеристических ионов на основе хроматограмм по полному ионному току с помощью программы Xcalibur. Идентификацию соединений проводили с использованием литературных данных и компьютерной библиотеки масс-спектров NIST 02.

Пиролитический анализ проводили в варианте «Rock-Eval» [22], а также путем сочетания двухступенчатого флэш-пиролиза и ГХ-МС продуктов деструкции в режиме «on line».

Для выбора режима флэш-пиролиза масел были использованы результаты их пиролитического анализа в варианте «Rock-Eval». Анализ проводили на пиролизаторе SR Analyzer™ (Humble Instruments & Services, Inc.) с использованием следующей температурной программы нагрева: изотермический (150 °С) нагрев в течение 3 мин, затем линейный нагрев со скоростью 25 °С/мин до 600 °С и выдержка при этой температуре в течение 1 мин.

Флэш-пиролиз масел проводили последовательно в две ступени при 300 и 600 °С в течение 15 с каждая. Анализ летучих продуктов в режиме «on-line» осуществляли на системе: газовый хроматограф HP 6890, масс-селективный датчик MSD 5975С. В газовом хроматографе использовали ко-

лонку HP-5MS длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм и толщиной нанесенной фазы 0,25 мкм. Температурная программа: изотерма при 40 °С (4 мин), нагрев со скоростью 5 °С/мин до 290 °С с выдержкой при этой температуре в течение 10 мин.

Результаты и их обсуждение

Сходство и различие изученных образцов проявляется по результатам их анализа с помощью ЯМР ^1H . Как видно из табл. 1, в ароматических структурах находится лишь каждый двадцатый протон. Отношение H_β/H_γ , которое может отражать длину алкильных заместителей или степень их разветвленности, у изученных образцов не отличается. В то же время отношение H_α/H_{ar} , которое при прочих равных условиях должно возрастать при увеличении числа заместителей в ароматических ядрах и уменьшаться при увеличении степени их конденсированности, заметно выше у МАБ.

Таблица 1. Относительное содержание протонов в различных структурных фрагментах изученных масел

Table 1. Content ratio of protons in different structure fragments of the examined oils

Образец Sample	H_{ar}	H_α	H_β	H_γ	H_β/H_γ	H_α/H_{ar}
	(%)					
МАБ/BAD*	4,47	13,32	59,43	22,78	2,61	2,98
МАЯН/OAYaP**	4,74	9,15	62,02	24,08	2,58	1,93
МВБН/OVDP***	5,16	10,22	61,04	23,59	2,59	1,98

*битум Ашальчинского месторождения – bitumen of Ashalchinskoe deposit (BAD)

**масла нефти Ай-Яунского месторождения – oil of Ay-Yaunskoe deposit petroleum (OAYaP)

***масла нефти Вахского месторождения – oil of Vakhskoe deposit petroleum (OVDP)

Хроматограммы по полному ионному току МАБ и МВБН (рис. 1) представляют собой «горбы», на фоне которых четко проявляются и идентифицируются по масс-спектрам пики алканов изопреноидного строения: пристана (Pr) и фитана (Ph). В правой части хроматограммы МАБ также видны и идентифицируются пики гопанов. На хроматограмме МАЯН пики перечисленных соединений отсутствуют. Идентификация других пиков на хроматограммах по полному ионному току по их масс-спектрам затруднительна.

Более детальная информация о составе различных типов соединений получена при использовании характеристических ионов для анализа результатов ГХ-МС. Как показано в [13], 50...80 %-я деструкция углеводородов нефти Вахского месторождения при лабораторной биодegradации резко снижает возможности определения группового и молекулярного состава масел. По результатам ГХ-МС анализа МВБН [13] по сравнению с маслами исходной нефти существенно меняется состав алканов, алкилбензолов, нафталинов и фенантронов. В частности, происходит резкое увеличение отно-

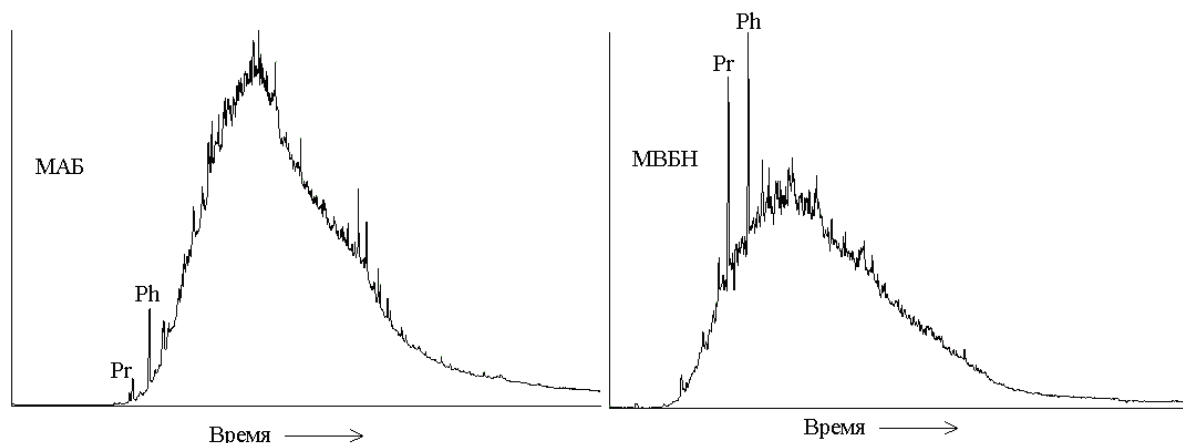


Рис. 1. Хроматограммы по полному ионному току МАБ и МВБН

Fig. 1. Chromatograms by total ion current of BAD and OVDP

сительной интенсивности пиков *Pr* и *Ph* на фоне слабовыраженных пиков *n*-алканов. Не удается идентифицировать моноциклические нафтенy (алкилциклогексаны). По сравнению с «горбом» заметно снижается интенсивность пиков всех групп алкилбензолов, что затрудняет их идентификацию за исключением пиков фитанилпроизводных. За счет биодegradации в групповом составе би- и трициклических ароматических углеводородов (АУ) резко снижается относительная интенсивность пиков незамещенных структур, метил- и диметилзамещенных гомологов, либо они совсем исчезают. В то же время состав тетрациклических АУ не меняется. Также не возникает проблем с идентификацией состава хейлантанов и гопанов, прегнанов и стеранов.

По результатам ГХ-МС анализа МАЯН в них удается идентифицировать нормальные и изопреноидные алканы, хейлантаны, гопаны состава C_{27} и C_{29} – C_{35} с максимумом на C_{30} . Есть прегнаны состава C_{21} , C_{22} и стераны C_{27} – C_{29} , в том числе диастераны.

Выявлено три типа алкилбензолов, причем монозамещенные бензолы – это, преимущественно, соединения с разветвленными алкильными заместителями: изомеры фенилалканов состава C_{16} – C_{19} , аналогичные идентифицированным в [23, 24].

В целом, относительное содержание бициклических АУ в МАЯН очень низкое. Тем не менее, удалось идентифицировать незамещенный нафталин и его гомологи до C_4 -нафталина, аценафтен и бифенил. Характерной особенностью МАЯН является явное (в 12,5 раз) преобладание бифенила над нафталином. Содержание аценафтена в 2 раза меньше, чем содержание нафталина.

Также низким является относительное содержание трициклических АУ. Среди них идентифицированы гомологи от фенантрена до C_4 -фенантрена с преобладанием C_3 -фенантрена. Содержание тетрациклических АУ в МАЯН еще ниже, чем трициклических.

Среди сераорганических ароматических соединений идентифицированы только дибензотиофен (ДБТ) и его гомологи до C_4 с преобладанием C_3 -ДБТ. Бензотиофены и бензонафтоотиофены в МАЯН не найдены.

По результатам ГХ-МС анализа МАБ среди алканов преобладают изопреноидные, причем содержание фитана явно выше, чем содержание пристана. Наличие *n*-алканов начиная с C_{14} , не вызывает сомнения, но их гораздо меньше, чем пристана, фитана и других изопреноидов. Нафтенy углеводороды представлены алкилциклогексанами, прегнанами, стеранами, хейлантанами и гопанами.

Среди гопанов присутствуют гомологи состава C_{27} и C_{29} – C_{35} с максимумом на C_{29} . Среди алкилбензолов преобладают тетразамещенные (алкилтриметилбензолы) с молекулярно-массовым распределением от C_{18} до C_{26} и максимумом на C_{20} .

В МАБ не удалось надежно доказать наличие бициклических АУ. В то же время наличие три(фенантрен и его гомологи до C_4 -фенантрена) и тетрациклических АУ (флуорантен, пирен, хризен, бензантрацен) не вызывает сомнений. Среди сераорганических ароматических соединений идентифицированы только дибензотиофен (ДБТ) и его гомологи до C_4 -ДБТ. Бензотиофены и бензонафтоотиофены в МАБ не идентифицированы.

Таким образом, из результатов, полученных с использованием ГХ-МС, следует, что некоторые соединения не выявляются при прямом анализе изученных образцов.

Для выбора режима флэш-пиролиза масел были использованы результаты их пиролитического анализа в варианте «Rock-Eval». Как следует из рис. 2, на пирограммах изученных масел наблюдается три этапа термических превращений образца. Интервал 150...220 °C (S_1) соответствует испарению образца. В интервале 220...400 °C (S_2) продолжается испарение и начинается деструкция лабильных связей (энергия разрыва C–S и S–S связей – 272 и 226 кДж/моль, соответственно [25]). В интервале

400...600 °C (S₂) осуществляется деструкция прочных связей (энергия разрыва С–С и С–О связей – 348 и 358 кДж/моль, соответственно [25]). В этом температурном интервале находится температура максимальной скорости деструкции образцов, соответствующая третьему максимуму на пирограммах. Температура 600 °C соответствует завершению деструкции образца. Суммарный выход летучих продуктов из изученных образцов за счет испарения и термической деструкции представлен в табл. 2. За исключением МВБН он близок к 100 %.

Таблица 2. Выход летучих продуктов при Rock-Eval-анализе изученных масел

Table 2. Volatile yield at Rock-Eval-analysis of the examined oils

Образец Sample	S ₁	S ₂ +S ₂	Суммарный выход Total yield
	мг/г (mg/g)		
МАБ/BAD	137	810	947
МАЯН/ОАУаР	194	606	800
МВБН/OVDP	353	190	543

На основе полученных результатов был выбран температурный режим первой и второй ступени проведения флэш-пиролиза масел – 300 и 600 °C. Первая температура является переходной между режимом испарения и деструкции образца, вторая соответствует завершению его деструкции.

Как правило, состав большинства соединений, выявленных методом ГХ-МС в летучих продуктах флэш-пиролиза изученных образцов при 300 °C, практически не отличается от состава соответствующих соединений в исходных образцах масел. Более существенное отличие характерно для летучих продуктов, полученных при 600 °C. Что заметно уже на хроматограммах по полному ионному току (рис. 3).

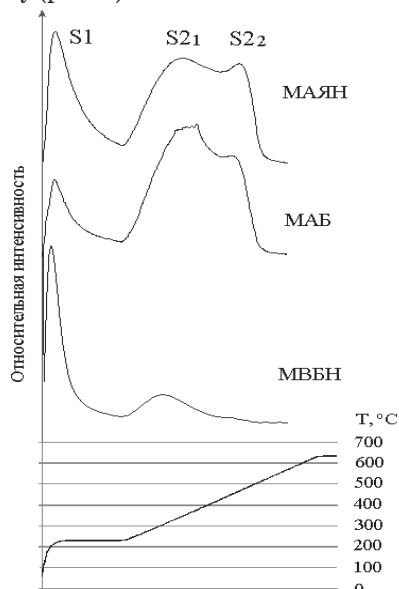


Рис. 2. «Rock-Eval» пирограммы изученных образцов масел

Fig. 2. «Rock-Eval» pyrograms of the studied oil samples

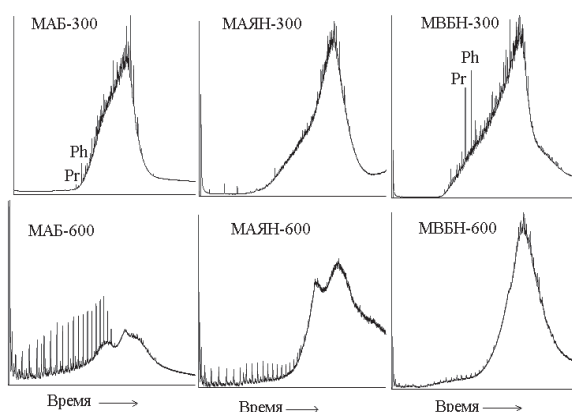


Рис. 3. Хроматограммы по полному ионному току летучих продуктов флэш-пиролиза МАБ, МАЯН и МВБН при 300 и 600 °C

Fig. 3. Chromatograms by total ion current of volatile of BAD, ОАУаР and OVDP flash-pyrolysis at 300 and 600 °C

На фоне сохранившегося и изменившего свою форму «горба» возросла относительная интенсивность пиков алканов. Как следует из рис. 3 и 4, появились низкомолекулярные гомологи n-алканов и α-олефинов, в пользу n-алканов изменилось отношение Pr/n-C₁₇ и Ph/n-C₁₈, возросли отношения Pr/Ph, i-C₁₈/Pr и i-C₁₈/Ph. Все перечисленные изменения являются результатом крекинга при 600 °C соответствующих структурных фрагментов и соединений, сосредоточенных в сложных высокомолекулярных компонентах масел.

Как следует из рис. 5, результаты ГХ-МС-анализа летучих продуктов флэш-пиролиза изученных масел при 600 °C свидетельствуют о наличии алкилциклогексанов в качестве структурных фрагментов в сложных высокомолекулярных компонентах масел.

Как видно из рис. 6, при увеличении температуры флэш-пиролиза от 300 до 600 °C среди гопанов во всех без исключения образцах резко увеличилась доля гомологов состава С₃₁–С₃₅. Причем, она существенно превышает долю гомологов состава С₂₇, С₂₉, С₃₀, которые преобладали в исходных маслах и летучих продуктах их флэш-пиролиза при 300 °C. Аналогичные изменения наблюдались при повышении температуры флэш-пиролиза масел асфальтита Ивановского месторождения от 400 до 650 °C [11, 12].

Единственным источником «высокомолекулярных» гопанов в продуктах высокотемпературной ступени флэш-пиролиза могли быть только сложные высокомолекулярные компоненты масел, в которых эти структурные фрагменты находились в химически связанном состоянии. Термическая деструкция не дает возможности однозначно определить характер этой связи. С учетом того, что соединения, которые не были выявлены в исходных образцах, идентифицируются только в летучих продуктах флэш-пиролиза при 600 °C, логично предположить, что это углерод-углеродная связь (С–С).

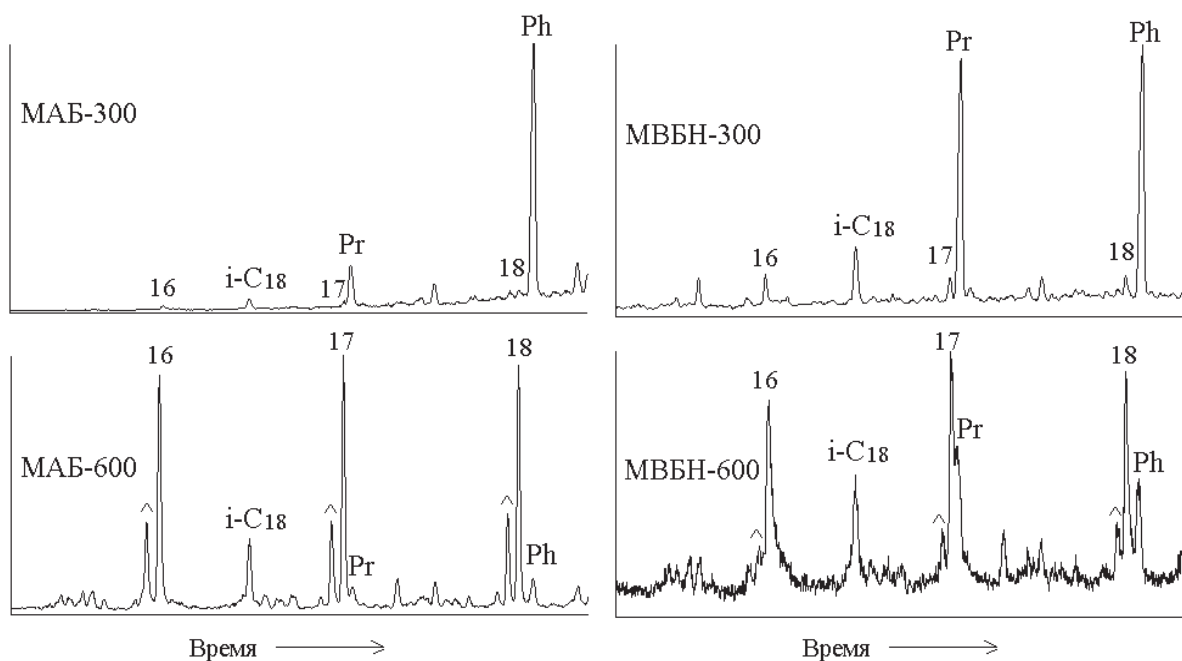


Рис. 4. Участок масс-хроматограмм по иону с $m/z=57$ летучих продуктов флэш-пиролиза МАБ и МВБН при 300 и 600 °С. Pr, Ph – пристан и фитан. ^ – α -олефины. Цифры соответствуют общему числу атомов углерода в молекуле n-алканов и изопреноидов

Fig. 4. Section of mass-chromatograms by the ion with $m/z=57$ of volatiles of BAD and OVDP flash-pyrolysis at 300 and 600 °C. Pr, Ph are the pristane and phytane. ^ is the α -olefins. The numbers correspond to the total amount of carbon atoms in a molecule of n-alkanes and isoprenoids

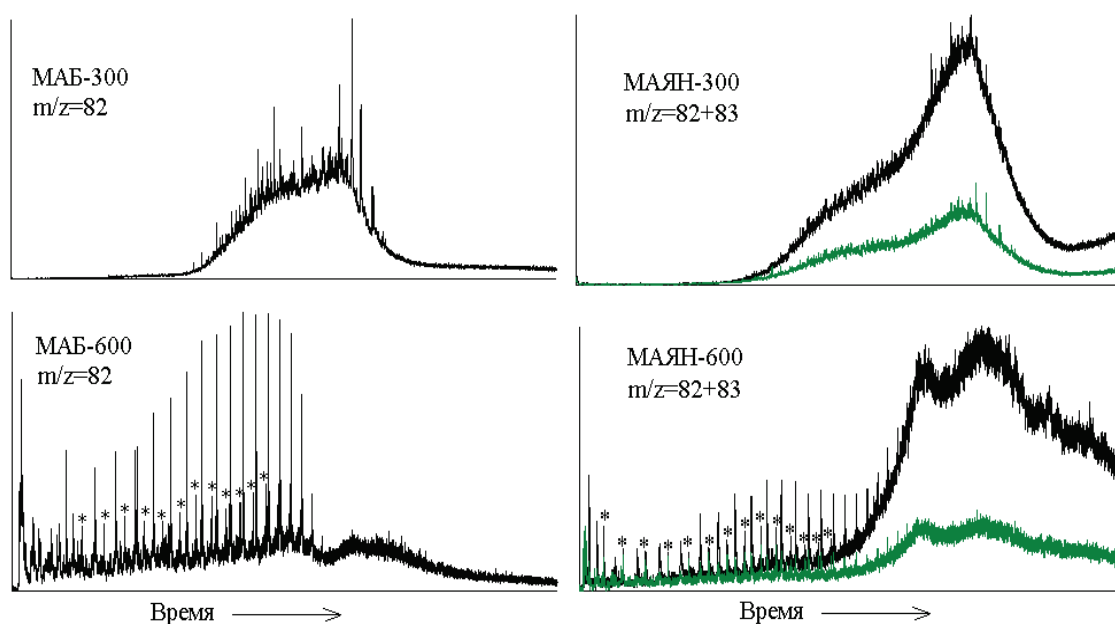


Рис. 5. Масс-хроматограммы по ионам с $m/z=82, 83$ летучих продуктов флэш-пиролиза МАБ и МАЯН при 300 и 600 °С. * – пики алкилциклогексанов

Fig. 5. Mass-chromatograms by ions with $m/z=82, 83$ of volatiles of BAD and OAYaP flash-pyrolysis at 300 and 600 °C. * are the peaks of alkyl-cyclohexane

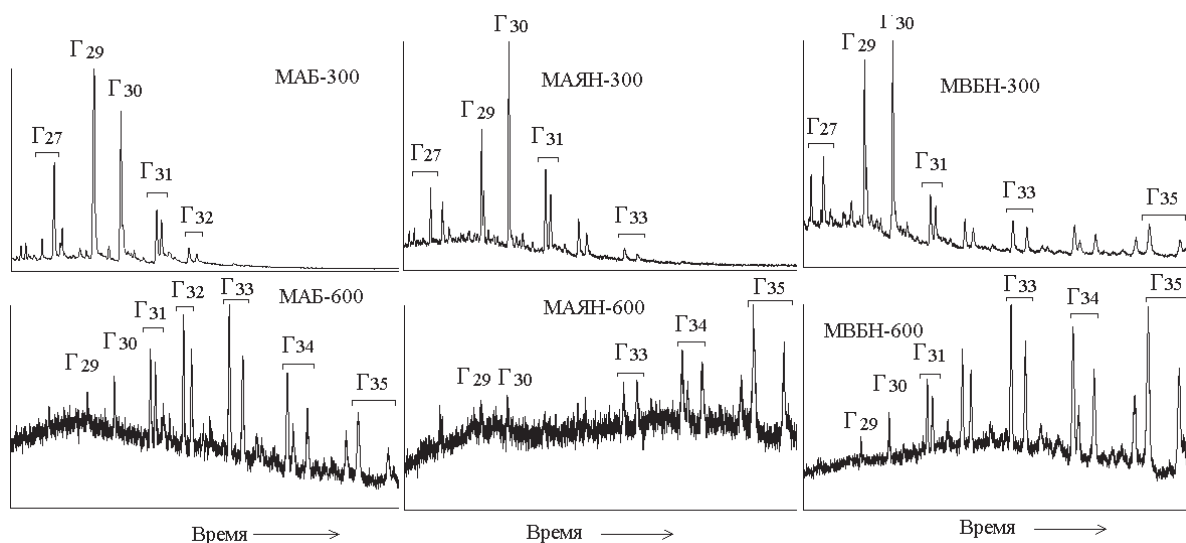


Рис. 6. Масс-хроматограммы по иону с $m/z=191$ (гопаны) летучих продуктов флэш-пиролиза МАБ, МАЯН и МВБН при 300 и 600 °С. Цифры соответствуют общему числу атомов углерода в молекуле гопанов

Fig. 6. Mass-chromatograms by ion with $m/z=191$ (hopanes) of volatiles of BAD, OAYaP and OVDP flash-pyrolysis at 300 and 600 °C. The numbers correspond to the total amount of carbon atoms in a hopane molecule

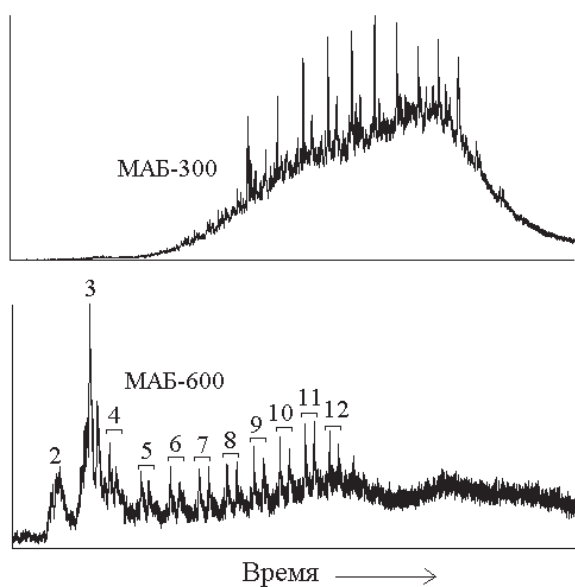


Рис. 7. Масс-хроматограммы по иону с $m/z=161$ (бензотиофены) летучих продуктов флэш-пиролиза МАБ при 300 и 600 °С. Цифры соответствуют общему числу атомов углерода в алкильных заместителях бензотиофенового ядра

Fig. 7. Mass-chromatograms by the ion with $m/z=161$ (benzothiophenes) of volatiles of BAD flash-pyrolysis at 300 and 600 °C. The numbers correspond to the total amount of carbon atoms in alkyl substituents of benzothiophene series

Как следует из рис. 7, в отличие от МАБ и МАБ-300, в летучих продуктах их флэш-пиролиза при 600 °С появились бензотиофены с общим числом атомов углерода в алкильных заместителях ароматического ядра от 2 до 12. Это свидетельствует о наличии алкилбензотиофенов в качестве химически связанных структурных фрагментов в сложных высокомолекулярных компонентах масел.

Заключение

Термический крекинг компонентов масел биодegradированных нефтей и природных битумов в условиях двухступенчатого флэш-пиролиза в сочетании с ГХ-МС-анализом летучих продуктов в режиме «on-line» позволяет получить дополнительную информацию о составе нефтяных масел, которая недоступна при их прямом ГХ-МС-анализе. Полученные результаты свидетельствуют о том, что алканы, алкилциклогексаны, гомогопаны и алкилбензотиофены присутствуют в изученных маслах не только в молекулярной форме, но и в виде химически связанных структурных фрагментов в составе сложных высокомолекулярных компонентов.

Авторы благодарят Томский региональный центр коллективного пользования ТНЦ СО РАН за предоставленные приборы (ЯМР-Фурье спектрометр AVANCE AV 300; масс-спектрометр высокого разрешения DFS, TermoElectron).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химия и геохимия пермских битумов Татарстана / Г.П. Каюкова, Г.В. Романов, Р.Х. Муслимов, Н.П. Лебедев, Г.А. Петров. – М.: Наука, 1999. – 304 с.
2. Tomson S.T., Eglinton G. Composition and sources of pollutant hydrocarbons in Severn Estuary // *Marine pollution bulletin*. – 1978. – № 9. – P. 134.
3. Gough M.A., Rowland S.J. Characterization of unresolved complex mixtures of hydrocarbons in petroleum // *Nature*. – 1990. – V. 334. – № 6267. – P. 648–650.
4. Killips S.D., Aljuboori M. Characterization of the unresolved complex mixtures (UCM) in the gas chromatograms of biodegraded petroleum // *Organic geochemistry*. – 1990. – V. 15. – № 2. – P. 147–160.
5. Van Dongen B.E., Schouten S., Sinnighe Damsté J.S. Sulfurization of carbohydrates in a sulfur-rich, unresolved complex mixture in kerogen pyrolysates // *Energy & Fuels*. – 2003. – V. 17. – № 4. – P. 1109–1118.
6. Analysis of unresolved complex mixture of hydrocarbons extracted from Late Archean sediments by comprehensive two-dimensional gas chromatography (GC-GC) / G.T. Ventura, F. Kenig, C.M. Reddy, G.S. Frysinger, R.K. Nelson, Mooy BenVan, R.B. Gaines // *Organic geochemistry*. – 2008. – V. 39. – № 7. – P. 846–867.
7. Resolving the unresolved complex mixture in motor oils using high-performance liquid chromatography followed by comprehensive two-dimensional gas chromatography / Mao D., H. van De Weghe, R. Lookman, G. Vanermen, N. de Bruker, L. Diels // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – № 2. – P. 312–318.
8. Use of comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry for the characterization of biodegradation and unresolved complex mixtures in petroleum / T.C. Tran, G.A. Logan, E. Grosjean, D. Ryan, P.J. Marriott // *Geochimica et cosmochimica acta*. – 2010. – V. 74. – № 22. – P. 6438–6484.
9. The composition, origin and fate of complex mixtures in the maltene fractions of hydrothermal petroleum assessed by comprehensive two-dimensional gas chromatography / G.T. Ventura, B.R.T. Simoneit, R.K. Nelson, C.M. Reddy // *Organic geochemistry*. – 2012. – V. 45. – № 4. – P. 48–65.
10. Антипенко В.Р., Чешкова Т.В. Состав соединений, связанных через эфирные и сульфидные мостики в маслах природного битума Ашальчинского месторождения // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 16–21.
11. Антипенко В.Р., Меленевский В.Н. Флэш-пиролиз природного асфальтита, его смолисто-асфальтеновых и масляных компонентов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 315. – № 3. – С. 87–91.
12. Антипенко В.Р., Меленевский В.Н. Состав летучих продуктов флэш-пиролиза природного асфальтита, его смолисто-асфальтеновых и масляных компонентов // *Нефтехимия*. – 2012. – Т. 52. – № 6. – С. 403–412.
13. Сваровская Л.И., Ельчанинова Е.А. Индикаторы окисления углеводородов нефти микрофлорой глубинных вод Вахской залежи // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 7. – С. 75–80.
14. Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Шпильман К.А. Нефтяные и газовые месторождения Западной Сибири. – М.: Недра. – 1971. – 464 с.
15. Требин Г.Ф., Чарыгин Н.В., Обухова Т.М. Нефти месторождений Советского Союза. Справочник. – М.: Недра. – 1980. – 583 с.
16. Рыльков А.В., Потеряева В.В. Нафтеносные нефти мира (распространение, генезис, применение) // *Нефть и газ*. – 2013. – № 1. – С. 32–43.
17. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 181 с.
18. Клубов Б.А. Природные битумы Севера. – М.: Наука, 1983. – 203 с.
19. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 264 с.
20. Современные методы исследования нефтей (справочно-методическое пособие) / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
21. Огородников В.Д. ЯМР-спектроскопия как метод исследования химического состава нефтей // *Инструментальные методы исследования нефти* / под ред. Г.В. Иванова. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 49–67.
22. Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1986. – V. 70. – № 3. – P. 318–329.
23. Особенности состава моноциклических ароматических углеводородов асфальтита Ивановского месторождения / В.Р. Антипенко, О.А. Голубина, И.В. Гончаров, С.В. Носова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 90–96.
24. Особенности состава моноциклических ароматических углеводородов асфальтита Ивановского месторождения / В.Р. Антипенко, О.А. Голубина, И.В. Гончаров, С.В. Носова, С.Б. Остроухов // *Нефтехимия*. – 2007. – Т. 47. – № 3. – С. 172–180.
25. Горонковский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. – Киев: Наукова думка, 1974. – 992 с.

Поступила 03.03.2015 г.

UDC 665.613:543.631:(543.57+543.54+543.51)

«BONDED» COMPOUNDS COMPOSITION IN THE OILS OF BIODEGRADATED PETROLEUM USING THEIR «ON-LINE» FLASH PYROLYSIS

Vladimir R. Antipenko,

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademicheskiiy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia. E-mail: avr@ipc.tsc.ru

Olga S. Bakanova,

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademicheskiiy Avenue, Tomsk,
634055, Russia. E-mail: olgapushkar@mail.ru

Vasiliy N. Melenevskiy,

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
SB RAS, 3, Prosp. Acad. Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russia.
E-mail: vmelenevsky@yandex.ru

Elena A. Elchaninova,

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademicheskiiy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia; National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: helene_tom@rambler.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to obtain and summarize the information on the composition and structure of oily and resin-asphaltene components from unconventional hydrocarbon sources – heavy high-viscosity oils and natural bitumen, most of which are biodegraded, for revealing their genesis, solving the problem of their production, transportation and processing, as well as rational use of the products obtained. The difficulties in obtaining information even about the compositions of oily components in the objects mentioned above, in particular by gas chromatography with a mass spectrometric detector (GC/MS), are caused by the fact that in the chromatograms, along with the peaks of the identified compounds, there is a so-called «hump», in which up to 90...95 % of the oily components is concentrated. The compositions of the components in the «hump» cannot be identified by a conventional GC/MS version. Besides, the published literature data indicate the presence of complex high-molecular components in petroleum oils, in which some types of compounds are chemically bonded. They also indicate that it is promising to use destructive methods to obtain information about the structure of the «bonded» fragments in oily components.

The main aim of the study is to obtain the information on the composition of «bonded» structural fragments in complex high-molecular oily components of the biodegraded oils and natural bitumen.

The methods used in the study: methods of NMR ¹H and gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS), analytical pyrolysis of oils (Rock-Eval and combination two-stage flash pyrolysis at 300 and 600 °C with «on-line» GC/MS analysis of volatile products of thermal destruction).

The results. Thermal cracking of oil components in the biodegraded oils and natural bitumen under the conditions of a two-stage «on-line» flash pyrolysis provides additional information on the compositions of petroleum oils (mineral oils), which is unavailable at their direct GC/MS analysis. The data obtained indicate the presence of «bonded» forms of alkanes, alkylcyclohexanes, homohopanes and alkylbenzotiofenenes in the compositions of the complex high-molecular components of oily studied.

Key words:

Biodegraded petroleum, natural bitumen, oils, analytical pyrolysis, «bonded» compounds, composition.

The authors thanks Tomsk regional sharing computing center TNTs SB RAS for the devices (NMR-Fourier spectrometer AVANCE AV 300; high resolution mass-spectrometer DFS, TermoElectron).

REFERENCES

1. Kayukova G.P., Romanov G.V., Muslimov R.Kh., Lebedev N.P., Petrov G.A. *Khimiya i geokhimiya permskikh bitumov Tatarstana* [Permian bitumens of Tatarstan. Chemistry and Geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 304 p.
2. Tomson S.T., Eglinton G. Composition and sources of pollutant hydrocarbons in Severn Estuary. *Marine pollution bulletin*, 1978, no. 9, p. 134.
3. Gough M.A., Rowland S.J. Characterization of unresolved complex mixtures of hydrocarbons in petroleum. *Nature*, 1990, vol. 334, no. 6267, pp. 648–650.
4. Killops S.D., Aljuboori M. Characterization of the unresolved complex mixtures (UCM) in the gas chromatograms of biodegraded petroleum. *Organic geochemistry*, 1990, vol. 15, no. 2, pp. 147–160.
5. Van Dongen B.E., Schouten S., Sinninghe Damsté J.S. Sulfurization of carbohydrates in a sulfur-rich, unresolved complex mixture in kerogen pyrolysates. *Energy & Fuels*, 2003, vol. 17, no. 4, pp. 1109–1118.
6. Ventura G.T., Kenig F., Reddy C.M., Frysinger G.S., Nelson R.K., Mooy BenVan, Gaines R.B. Analysis of unresolved complex mixture of hydrocarbons extracted from Late Archean sediments by comprehensive two-dimensional gas chromatography (GC-GC). *Organic geochemistry*, 2008, vol. 39, no. 7, pp. 846–867.
7. Mao D., Van De Weghe H., Lookman R., Vanermen G., De Bruker N., Diels L. Resolving the unresolved complex mixture in

- tor oils using high-performance liquid chromatography followed by comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Fuel*, 2009, vol. 88, no. 2, pp. 312–318.
8. Tran T.C., Logan G.A., Grosjean E., Ryan D., Marriott P.J. Use of comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry for the characterization of biodegradation and unresolved complex mixtures in petroleum. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2010, vol. 74, no. 22, pp. 6438–6484.
 9. Ventura G.T., Simoneit B.R.T., Nelson R.K., Reddy C.M. The composition, origin and fate of complex mixtures in the maltene fractions of hydrothermal petroleum assessed by comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Organic geochemistry*, 2012, vol. 45, no. 4, pp. 48–65.
 10. Antipenko V.R., Cheshkova T.V. Sostav soedineniy, svyazannykh cherez efirnye i sulfidnye mostiki v maslakh prirodnogo bituma Ashalchinskogo mestorozhdeniya [Composition of the compounds bonded via ether, ester and sulfide linkages in oils of natural bitumen from Ashalchinskoe deposit]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 16–21.
 11. Antipenko V.R., Melenevskii V.N. Flesh piroliz prirodnogo asfaltita, ego smolisto-asfaltenovykh i maslyanykh komponentov [Flash pyrolysis of natural asphaltite and its resin-asphaltene and oil components]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 3, pp. 87–91.
 12. Antipenko V.R., Melenevskii V.N. Composition of volatile products of flash pyrolysis of natural asphaltite and its resin-asphaltene and oil components. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 6, pp. 373–382.
 13. Svarovskaya L.I., Elchaninova E.A. Indikatory okisleniya uglevodorodov nefiti mikrofloroy glubinnykh vod Vakhskoy zalezhi [Indicators of petroleum hydrocarbons oxidation by microflora of Vakhskaya deposit deep-water]. *Voda: khimiya i ekologiya – Water: chemistry and ecology*, 2014, no. 7, pp. 75–80.
 14. Nesterov I.I., Salmanov F.K., Shpilman K.A. *Neftyanye i gazovye mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri* [Oil and gas fields of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 464 p.
 15. Trebin G.F., Charygin N.V., Obukhova T.M. *Nefti mestorozhdeniy Sovetskogo Soyuz. Spravochnik* [Oils of the fields of the Soviet Union. Reference manual]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 583 p.
 16. Rylkov A.V., Poteryaeva V.V. Naftenovye nefiti mira (rasprostraneniye, genesis, primeneniye) [Global naphthene-base crudes (propagation, genesis, application)]. *Neft i gaz – Oil and gas*, 2013, no. 1, pp. 32–43.
 17. Goncharov I.V. *Geokhimiya neftey Zapadnoy Sibiri* [Geochemistry of the oils of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 181 p.
 18. Klubov B.A. *Prirodnye bitумы Severa* [Natural bitumens of the North]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 203 p.
 19. Petrov A.I. *Uglevodorody nefiti* [Hydrocarbons of crude oil]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 264 p.
 20. *Sovremennyye metody issledovaniya neftey (spravochno-metodicheskoe posobie)* [A Manual of Modern Oil Investigation Techniques]. Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
 21. Ogorodnikov V.D. YAMR-spektroskopiya kak metod issledovaniya khimicheskogo sostava neftey [NMR-spectroscopy as method of oil chemical composition study]. *Instrumentalnye metody issledovaniya nefiti* [Instrumental methods of oil study]. Ed. by G.V. Ivanov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. pp. 49–67.
 22. Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1986, vol. 70, no. 3, pp. 318–329.
 23. Antipenko V.R., Golubina O.A., Goncharov I.V., Nosova S.V. Osobennosti sostava monotsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov asfaltita Ivanovskogo mestorozhdeniya [Specifics of the composition of monocyclic aromatic hydrocarbons in asphaltite from the Ivanovskoye deposit]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 5, pp. 90–96.
 24. Antipenko V.R., Golubina O.A., Goncharov I.V., Nosova S.V., Ostroukhov S.B. Specifics of the composition of monocyclic aromatic hydrocarbons in asphaltite from the Ivanovskoye deposit. *Petroleum Chemistry*, 2007, vol. 47, no. 3, pp. 154–161.
 25. Goronovskiy I.T., Nazarenko Yu.P., Nekryach E.F. *Kratkiy spravochnik po khimii* [Short chemical manual]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 992 p.

Received: 03 March 2015.

УДК 544.452.2

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ОКСИДА МАГНИЯ НА СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ

Ильин Александр Петрович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ilyin@tpu.ru

Роот Людмила Олеговна,

канд. техн. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: tolbanova@mail.ru

Кривошеина Виктория Валерьевна,

аспирант кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: genchem@mail.ru

В настоящее время разработка новых методов получения нитридов является актуальным вопросом. Это связано с их использованием в разных областях промышленности.

Цель работы: определение закономерностей фазообразования продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с добавками оксида магния.

Методы исследования. Для выполнения качественного и количественного фазового анализа использовали рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3,0); для расчетов параметров химической активности смесей и определения их пирофорности использовали дифференциально-термический анализ (термоанализатор SDT Q600 Научно-аналитического центра ТПУ); для определения микроструктуры исходных материалов и продуктов синтеза использовали электронный микроскопический анализ (электронные микроскопы Jeol-840 и Hitachi SU8000).

Результаты. Исследование параметров химической активности смесей показало, что смеси не пирофорны в воздухе и не требуют дополнительных мер предосторожности. На рентгенограммах интенсивность 100%-го рефлекса нитрида алюминия повышалась с 75 % для продуктов сгорания в воздухе нанопорошка алюминия до 100% для продуктов сгорания в воздухе нанопорошка алюминия с добавкой 12,5 мас. % оксида магния. При увеличении добавки оксида в исходной смеси магния до 25 мас. % содержание нитрида в продуктах сгорания снижалось, но усиливались рефлексы шпинели $MgAl_2O_4$ и непрореагировавшего MgO . Дальнейшее увеличение MgO в смеси до 50 мас. % приводило к существенному снижению 100%-го рефлекса нитрида алюминия и повышению содержания фаз шпинели $MgAl_2O_4$ и несгоревшего оксида магния. Продукты сгорания смеси нанопорошка алюминия в смеси с 75 мас. % оксида магния в основном были представлены фазами непрореагировавшего оксида магния и шпинели $MgAl_2O_4$, в то время как остальные фазы имели интенсивность максимальных рефлексов менее 20 %.

Ключевые слова:

Нанопорошок алюминия, оксид магния, параметры химической активности, продукты сгорания, синтез сжиганием, нитрид алюминия.

Введение

При сгорании нанопорошка алюминия в воздухе конечные продукты содержат более 30 мас. % нитрида алюминия [1], что не соответствует термодинамическим расчетам: нитрид должен доокисляться [2]. Исследование продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе с добавками оксидов TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 и других показало, что в продуктах сгорания стабилизируются соответствующие нитриды [3–5]. Образование нитридов из оксидов при горении нанопорошка алюминия предполагает восстановление оксидов, по крайней мере, до субоксидов алюминием при высокой температуре с последующим взаимодействием субоксидов (металлов) с азотом воздуха и образованием нитридов [3].

В работе [6] были изучены конечные продукты сгорания нанопорошка алюминия с добавками оксида кальция – оксида элемента II-ой группы Периодической системы Д.И. Менделеева. Показано, что на рентгенограмме, кроме известных продуктов сгорания, присутствовали отдельные рефлексы фазы Ca_3N_2 , что может объясняться анизотропной структурой кристаллов, образующихся в неравновесных условиях горения. Магний, в отличие от кальция, при сгорании в воздухе образует нитрид магния (Mg_3N_2) [7], данные о формировании нитрида магния из его оксида при высокой температуре при горении нанопорошка алюминия в воздухе в литературе отсутствуют [7, 8]. В то же время ранее было показано, что при сгорании смесей НП

алюминия с диоксидами элементов IV группы побочной подгруппы образуются соответствующие нитриды (MeN), что является следствием восстановления диоксидов и взаимодействия продуктов восстановления с азотом воздуха [3].

Целью настоящей работы являлось определение закономерностей фазообразования продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с добавками оксида магния.

Методики эксперимента и характеристики объекта исследований

В работе использовали нанопорошок (НП) алюминия, полученный с помощью электрического взрыва проводников в аргоне [9].

Нанопорошок алюминия, полученный в среде аргона, является пирофорным, т. е. воспламеняется при контакте с воздухом. Его пассивировали медленным окислением малыми добавками воздуха [10, 11]. Смесей нанопорошка алюминия с порошком оксида магния (реактив марки ХЧ) готовили перемешиванием компонентов в сухом воздухе.

Навески нанопорошка алюминия и оксида магния смешивали в металлическом боксе на кальке с использованием пробки, обернутой в кальку, так как неизвестны характеристики смесей, связанные с трением и электростатическим электричеством. Смешивание проводили до тех пор, пока не исчезала неравномерность в окраске смеси. Было приготовлено 4 образца, содержащих 12,5; 25; 50 и 75 мас. % оксида магния, и один образец нанопорошка алюминия без добавок, который использовали в качестве образца для сравнения.

Иницирование процесса горения осуществляли с помощью нихромовой спирали, через которую пропускали электрический ток, при этом навеске старались придать коническую форму. Процесс горения проходил на подложке из нержавеющей стали толщиной 2 мм.

Для выполнения качественного и количественного фазового анализа использовали дифрактометр ДРОН-3,0. Диапазон сканирования углов составлял 20–90 град. В работе применяли излучение медной трубки $\text{Cu}_{K\alpha}$. Предварительно продукты сгорания дезагрегировали и просеивали через сито с размером ячеек 63 мкм. Для идентификации кристаллических фаз использовали карту теку PDF-4.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводили с использованием термоанализатора SDT Q-600 Научно-аналитического центра Томского политехнического университета. Точность измерения температуры составляла 0,001 град. Исходные смеси нанопорошка алюминия с оксидом магния проверяли на пирофорность путем расчета по ДТА четырех параметров активности [12, 13]: температура начала окисления ($t_{\text{н.о.}}$, °C), максимальная скорость окисления (V_{max}), степень окисленности (α), удельный тепловой эффект (ΔH).

Электронный микроскопический анализ продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия с оксидом магния проводили с использованием электронных микроскопов Jeol-840 и Hitachi SU8000. Перед съемкой образцы помещали на поверхность алюминиевого столика диаметром 25 мм, фиксировали при помощи электропроводящего клея. Морфологию образцов исследовали без нанесения проводящего слоя, чтобы исключить поверхностные эффекты. Съемку изображений вели в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 2 кВ и рабочем расстоянии 4–5 мм [14, 15].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для проверки нанопорошка алюминия и его смесей с оксидом магния на пирофорность была исследована их термическая устойчивость [11]. Образцы нагревали в воздухе до 900 °C со скоростью 10 град/мин.

На рис. 1 и 2 приведены типичные термограммы смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния.

В табл. 1 приведены параметры активности смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния.

Таблица 1. Параметры активности смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния*

Table 1. Activity parameters of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide*

Содержание оксида магния в образце, мас. % Magnesium oxide content in a sample, wt. %	Параметры активности смесей Activity parameters of the mixtures			
	Температура начала окисления, $T_{\text{н.о.}}$, °C Temperature of oxidation beginning, $T_{\text{об.}}$, °C	Максимальная скорость окисления, V_{max} , мг/мин Oxidation peak velocity, V_{max} , mg/min	Степень окисленности, α , % Oxidation level, α , %	Удельный тепловой эффект, ΔH , Дж/г Specific heat effect, ΔH , J/g
0	400	0,19	24,9	5384
12,5	430	0,18	24,0	5211
25	420	0,21	17,2	5145
50	430	0,22	33,0	5204
75	460	0,20	20,4	5192

*При расчетах α и ΔH введена поправка на содержание НП алюминия в смесях с MgO.

*When calculating α and ΔH the authors had made a correction for aluminum nanopowder in mixtures with MgO.

Температура начала окисления смесей выше, чем для нанопорошка алюминия на 20–60 град. Аналогично максимальная скорость окисления ($\Delta m/\Delta t$ на линейном участке увеличения массы на термограмме) смесей при их горении имеет большее значение, чем для нанопорошка алюминия без добавок, максимально на 15,8 %. В условиях линейного нагрева максимальная скорость окисления проходила через максимум: 22,0 мг/мин (для смеси, содержащей 50 мас. % MgO). Для данной смеси максимальна и степень окисленности (33 %). Удель-

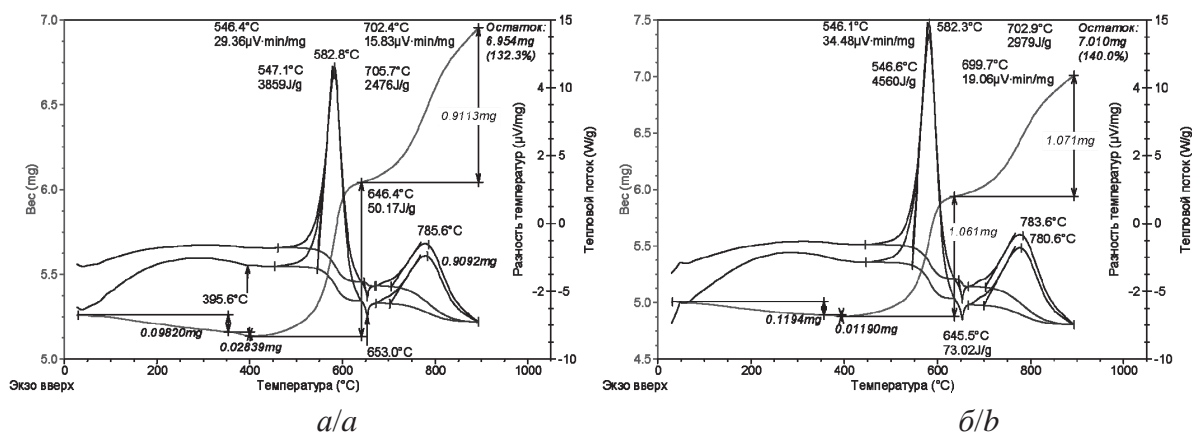


Рис. 1. Термограммы смесей нанопорошка алюминия с добавкой оксида магния: а) 25 мас. %, $m_{\text{образца}}=5,257$ мг; б) 50 мас. %, $m_{\text{образца}}=5,006$ мг

Fig. 1. Thermograms of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide additive: a) 25 wt. %, $m_{\text{sample}}=5,257$ mg; б) 50 wt. %, $m_{\text{sample}}=5,006$ mg

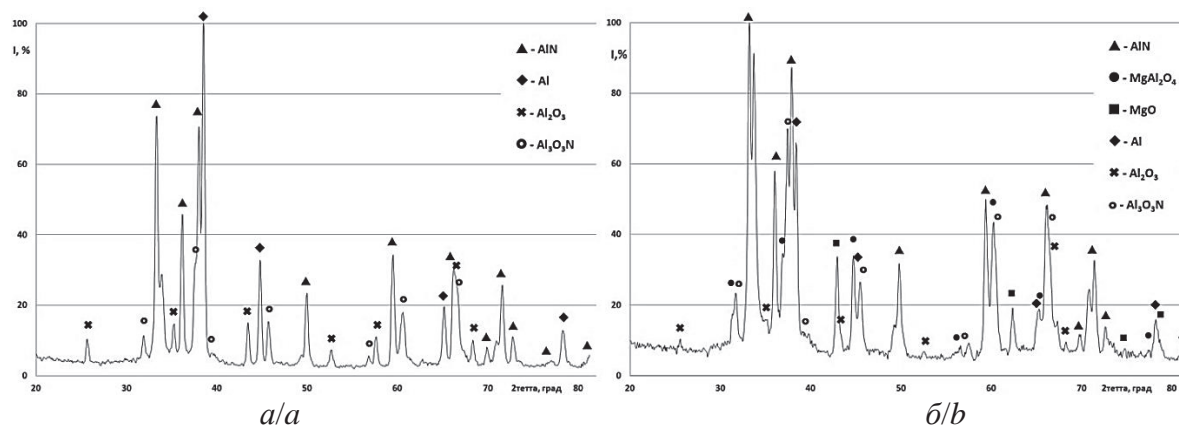


Рис. 2. Рентгенограммы продуктов сгорания нанопорошка алюминия: а) без добавок; б) с добавкой оксида магния 12,5 мас. %

Fig. 2. X-ray patterns of aluminum nanopowder combustion products: a) without additives; б) with 12,5 wt. % magnesium oxide additive

ный тепловой эффект 5384 Дж/г получен для НП алюминия без добавок, добавление к нанопорошку алюминия оксида магния привело к незначительному (максимально на 4,4 %) уменьшению удельного теплового эффекта. Все приготовленные смеси имели температуру начала окисления выше 300 °С, поэтому не склонны к пирофорности.

На рис. 2 и в табл. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия с оксидом магния.

Согласно РФА (рис. 2, табл. 2) при введении в нанопорошок алюминия 12,5 мас. % порошка оксида магния увеличился выход нитрида алюминия, в то время как параметры химической активности смеси понизились (табл. 1) в сравнении с параметрами нанопорошка без добавок. При сравнении 100%-х рефлексов кристаллических фаз продуктов сгорания смесей НП алюминия с оксидом магния среди продуктов обнаружена фаза алюмомагнезиальной шпинели $MgAl_2O_4$, которая была синтезирована ранее в работе [16]. Содержание шпинели

было максимально для продуктов сгорания смеси с 50 мас. % оксида магния и превышало содержание нитрида и оксинитрида алюминия, а рефлексы оксида алюминия на рентгенограмме практически отсутствовали. Интенсивность 100%-го рефлекса нитрида алюминия в продуктах сгорания увеличилась при введении в смесь 12,5 мас. % оксида магния, а затем – уменьшалась с повышением содержания оксида магния в исходной смеси. Также снижалась интенсивность 100%-го рефлекса фазы алюминия с увеличением содержания оксида магния в смеси. Начиная с продуктов сгорания смеси, содержащей 25 и более мас. % оксида магния, в продуктах сгорания не обнаруживались рефлексы оксидов алюминия. После добавления оксида магния (12,5 мас. %) интенсивность 100%-го рефлекса оксинитрида алюминия возросла более чем в два раза, а затем для продуктов сгорания исходной смеси с 25 мас. % MgO резко снизилась (в 6 раз), до нуля – для образца, содержащего 75 мас. % MgO .

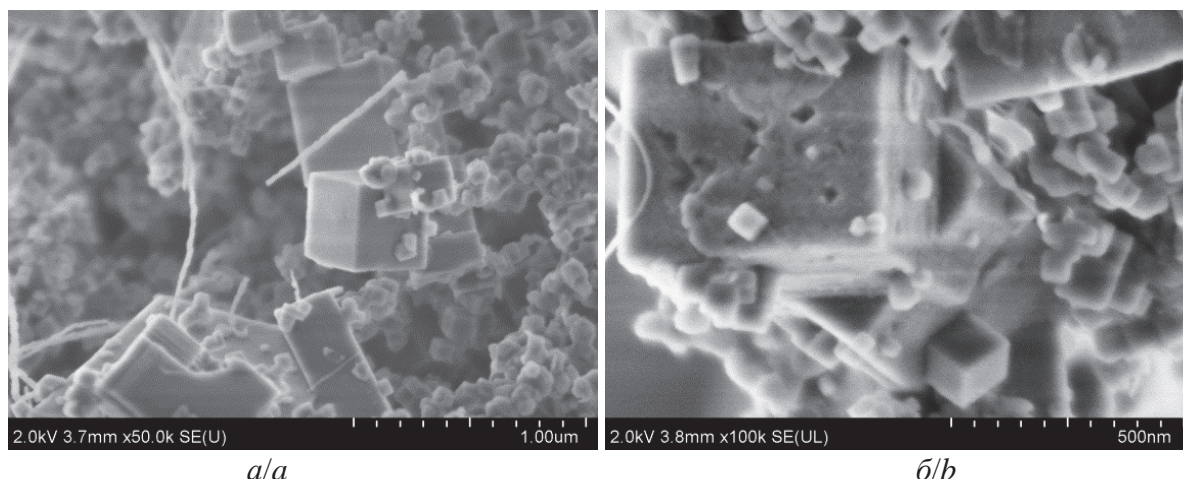


Рис. 3. Микрофотографии продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния: а) 12,5 мас. % MgO; б) 75 мас. % MgO

Fig. 3. Microphotograph of combustion products of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide: a) 12,5 wt. % MgO; б) 75 wt. % MgO

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния

Table 2. Results of X-ray analysis of combustion products of aluminum nanopowder mixtures with magnesium oxide

Содержание оксида магния в исходном образце, мас. % Magnesium oxide content in the original sample, wt. %	Интенсивность 100%-го рефлекса, % Intensity of 100% reflex, %					
	MgAl ₂ O ₄	MgO	AlN	Al	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ N
0	0,00	0,00	73,62	100,00	15,02	31,87
12,5	34,65	33,69	100,00	65,94	15,92	69,88
25	53,37	52,00	78,37	27,44	0,00	62,82
50	93,90	100,00	48,53	29,26	0,00	10,49
75	34,02	100,00	5,69	11,30	0,00	0,00

Микрофотографии продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния представлены на рис. 3.

Продукты сгорания НП алюминия в воздухе содержат в качестве основной кристаллической фазы нитрид алюминия, а также оксид и оксинитрид алюминия. При этом продукты, согласно электронной микроскопии, представляют собой агрегаты частиц и нитевидные кристаллы нитрида алюминия [17].

Согласно полученным в работе данным (рис. 3), при добавлении к нанопорошку алюминия оксида магния наряду с продуктами сгорания типичной морфологии на микрофотографии видны микронные кристаллы кубической формы, наиболее вероятно, относящиеся к фазам оксида магния и алюмомагнезиальной шпинели MgAl₂O₄.

При высоком содержании оксида магния (75 мас. %) в продуктах сгорания присутствовали преимущественно кристаллические структуры без нитевидных кристаллов (рис. 3, б), что согласуется с данными РФА (табл. 2): в продуктах сгорания данной смеси интенсивность 100%-го рефлекса нитрида алюминия составляла 5,7 %.

Выводы

1. Смесей нанопорошка алюминия с оксидом магния не пиррофорны: их температура начала окисления на 20–60 град выше, чем для нанопорошка алюминия без добавок (400 °С).
2. Максимальная скорость окисления и степень окисленности максимальны для смеси нанопорошка алюминия, содержавшего 50 мас. % оксида магния, но последний снижает тепловой эффект сгорания для всех смесей.
3. Добавка оксида магния к нанопорошку алюминия (12,5 мас. %) приводит к повышению выхода нитрида и оксинитрида алюминия и к появлению в продуктах сгорания кристаллической фазы алюмомагнезиальной шпинели MgAl₂O₄, выход которой максимален в продуктах сгорания смеси с 50 мас. % оксида магния.
4. При сгорании смеси нанопорошка алюминия с 50 мас. % оксида магния максимальную интенсивность имеет 100%-й рефлекс фазы шпинели (не считая 100%-го рефлекса фазы MgO), в то же время фазы оксидов алюминия в продуктах сгорания отсутствуют.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-03-05385.

Авторы благодарят Отдел структурных исследований ИОХ РАН за исследование образцов с помощью метода электронной микроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.П., Громов А.А. Горение порошков алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.
2. О влиянии азота на горение алюминия / В.М. Боборыкин, В.М. Гремячкин и др. // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 3. – С. 22–30.
3. Синтез нитридов титана и циркония сжиганием в воздухе смесей их оксидов с нанопорошком алюминия / Ю.А. Амелькович, А.П. Астанкова, Л.О. Толбанова, А.П. Ильин // Новые огнеупоры. – 2007. – № 11. – С. 64–67.
4. Шинкевич Е.В., Рот Л.О., Ильин А.П. Синтез нитридов сжиганием нанопорошка алюминия в смеси с диоксидами титана, циркония и гафния в воздухе // Огнеупоры и техническая керамика. – 2013. – № 3. – С. 34–39.
5. Шинкевич Е.В., Рот Л.О., Ильин А.П. Получение нитридов титана, циркония и гафния при горении в воздухе нанопорошка алюминия в смесях с диоксидами // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 3. – С. 60–65.
6. Ильин А.П., Рот Л.О., Кривошеина В.В. Влияние добавки оксида кальция на состав продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 3. – С. 137–143.
7. Самсонов Г.В. Нитриды. – Киев: Наукова думка, 1969. – 390 с.
8. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин и др. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 382 с.
9. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Тихонов Д.В. Электрический взрыв проводников. Получение нанопорошков металлов и тугоплавких неметаллических соединений. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co/KG, 2012. – 274 с.
10. Громов А.А., Ильин А.П., Тихонов Д.В. Проблемы пассивации ультрадисперсных порошков алюминия // Перспективные материалы. – 2003. – № 2. – С. 95–101.
11. Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explosion of wires / Y.S. Kwon, A.A. Gromov, A.P. Ilyin, G.N. Kim // Applied Surface Science. – 2003. – V. 211. – № 1–4. – P. 57–67.
12. Ильин А.П., Громов А.А., Яблунский Г.В. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 58–62.
13. Characterization of Aluminum Powders. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders / A.P. Ilyin, A.A. Gromov, B. An, F. Faubert et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – V. 27. – № 6. – P. 361–364.
14. Комплексное исследование структуры и механизмов получения и превращений газообразных, жидких и твердых химических систем методами масс-спектрометрии, спектроскопии ЯМР и электронной микроскопии / В.В. Качала, Л.Л. Хемчян, А.С. Кашин и др. // Успехи химии. – 2013. – № 82. – С. 648–685.
15. Кашин А.С., Анаников В.П. Формирования наноразмерных покрытий и наночастиц металлов путем магнетронного распыления и их исследование методом сканирующей электронной микроскопии // Изв. академии наук. Сер. Хим. – 2011. – № 12. – С. 2551–2556.
16. Хабас Т.А., Мельников А.Г., Ильин А.П. Синтез керамических материалов на основе оксида магния и алюминия в режиме горения // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – № 11. – С. 14–19.
17. Ильин А.П., Толбанова Л.О. Продукты горения смесей нанопорошков алюминия и вольфрама в воздухе // Физика горения и взрыва. – 2007. – № 4. – С. 59–65.

Поступила 21.02.2015 г.

UDC 544.452.2

THE INFLUENCE OF MAGNESIUM OXIDE ADDITION ON THE CONTENT OF COMBUSTION PRODUCTS OF ALUMINUM NANOPOWDER IN AIR

Alexander P. Ilyin,

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

Lyudmila O. Root,

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

Viktoria V. Krivosheina,

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

Currently, the development of new methods for nitrides of alkali and alkaline earth elements is an important issue. It is related to the use of nitrides of these elements in different areas of industry.

The aim of the investigation is to determine the regularities of phase formation of air combustion products of aluminum nanopowder with additions of magnesium oxide mixtures.

The methods of the investigation. To perform the qualitative and quantitative phase analysis the X-ray diffraction (diffractometer DRON-3,0) was used; for calculating chemical activity parameters of mixtures and determining their ignition ability the differential thermal analysis (thermoanalyzer SDT Q600 of Scientific Analytical Center of TPU) was used; to determine the microstructure of the initial materials and products of synthesis the electron microscopic analysis (electron microscopes Jeol-840 and Hitachi SU8000) was used.

The results of the investigation. The study of chemical activity parameters of the mixtures showed that the mixtures are not pyrophoric in air and do not require extra precautions. The X-ray diffraction data showed that the intensity of 100 % reflex of aluminum nitride increased from 75 % for aluminum nanopowder combustion products in air up to 100 % for products of combustion in air of aluminum nanopowder with the addition 12,5 wt. % of magnesium oxide. After increasing the additive of magnesium oxide in the initial mixture up to 25 wt. % the aluminium nitride content in the combustion products went down, but the reflexes of magnesium-aluminate spinel $MgAl_2O_4$ and unreacted MgO were intensified. Further increase of MgO in the mixture to 50 wt. % led to significant reduction of 100 % reflection of aluminum nitride and enhanced the content of spinel $MgAl_2O_4$ and unburned MgO . The combustion products of aluminum nanopowder with 75 wt. % of magnesium oxide mixture were mainly represented by the phases of unburned MgO and spinel $MgAl_2O_4$, while the reflections of the other phases had the intensity less than 20 %.

Key words:

Aluminum nanopowder, magnesium oxide, chemical activity parameters, combustion products, burning synthesis, aluminum nitride.

The research was partially financially supported by the grant RFBR no. 15-03-05385.

The authors thank the department of structural survey of the Institute of Organic Chemistry of the Russian Academy of Sciences for the samples investigation by the method of electron microscopy.

REFERENCES

- Ilin A.P., Gromov A.A. *Gorenie poroshkov alyuminiya i bora v sverkh-tonkom sostoyanii* [Burning of aluminum and boron in ultrafine state]. Tomsk, Tomsk state Univ. Publ., 2002. 154 p.
- Boborykin V.M., Gremyachkin V.M. O vliyani azota na gorenie alyuminiya [About the influence of nitrogen on aluminum burning]. *Combustion, explosion and shock waves*, 1983, no. 3, pp. 22-30.
- Amelkovich Yu.A., Astankova A.P., Tolbanova L.O., Ilin A.P. Sintez nitridov titana i tsyrkoniya szhiganiem v vozduhe smesey ih oksidov s nanoporoshkom alyuminiya [Synthesis of titanium and zirconium nitrides by combustion mixtures of their oxides with aluminum nanopowder in the air]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 425-428.
- Shinkevich E.V., Root L.O., Ilin A.P. Sintez nitridov szhiganiem nanoporoshka alyuminiya v smesi s dioksidami titana, zirkoniya i gafniya v vozdukh [Synthesis of nitrides at combustion of aluminum nanopowder with titanium, zirconium and hafnium dioxides in air]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2013, no. 3, pp. 34-39.
- Shinkevich E.V., Root L.O., Ilin A.P. Poluchenie nitridov titana, tsirkoniya i gafniya pri goreнии v vozdukh nanoporoshka alyuminiya v smesyakh s dioksidami [Synthesis of titanium, zirconium and hafnium nitrides at combustion of aluminum nanopowder with dioxides in air]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 3, pp. 60-65.
- Ilin A.P., Root L.O., Krivosheina V.V. Vliyanie dobavki oksida kaltsiya na sostav produktov sgoraniya nanoporoshka alyuminiya v vozdukh [The influence of calcium oxide addition on the content of combustion products of aluminum nanopowder in air]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 3, pp. 137-143.
- Samsonov G.V. *Nitridy* [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 390 p.
- Gromov A.A., Khabas T.A., Ilin A.P., Popenko E.M., Korotkikh A.G., Arkhipov V.A., Ditts A.A., Tolbanova L.O., Strokovaya Yu.I. *Gorenie nanoporoshkov metallov* [Metal nanopowder burning]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2008. 382 p.
- Nazarenko O.B., Ilin A.P., Tikhonov D.V. *Elektricheskiy vzryv provodnikov. Poluchenie nanoporoshkov metallov i tugoplavkikh nemetallicheskiikh soedineniy* [Preparation of nano-metals and refractory non-metallic compounds]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co/KG, 2012. 274 p.
- Gromov A.A., Ilin A.P., Tikhonov D.V. Problemy passivatsii ultradispersnykh poroshkov alyuminiya [The problems of ultradisperse aluminum powders passivation]. *Perspektivnye materialy*, 2003, no. 2, pp. 95-101.
- Kwon Y.S., Gromov A.A., Ilyin A.P., Kim G.H. Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explosion of wires. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 211, no. 1-4, pp. 57-67.
- Ilin A.P., Gromov A.A., Yablunovskiy G.V. Ob aktivnosti poroshkov alyuminiya. [About activity of aluminum powders]. *Combustion, explosion and shock waves*, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 58-62.
- Ilin A.P., Gromov A.A., An V.V., Faubert F. Characterization of Aluminum Powders. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 361-364.
- Kachala V.V., Khemchyan L.L., Kashin A.S. Kompleksnoe issledovanie struktury i mekhanizmov polucheniya i prevrashcheniya gazoobraznykh, zhidkikh i tverdykh khimicheskikh sistem metodami mass-spektrometrii, spektroskopii YAMR i elektronnoy mikroskopii [A comprehensive study of the patterns and mechanisms of reception and transformation of gaseous, liquid and solid chemical systems by mass spectrometry, NMR spectroscopy and electron microscopy]. *Uspekhi khimii*, 2013, no. 82, pp. 648-685.
- Kashin A.S., Anannikov V.P. Formirovaniya nanorazmernykh pokrytiy i nanochastits metallov putem magnetronnogo raspyleniya i ikh issledovanie metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii [The formation of nanoscale coatings and nanoparticles of metals by magnetron sputtering and their study by scanning electron microscopy]. *Izvestiya akademii nauk. Ser. Khim.*, 2011, no. 12, pp. 2551-2556.
- Khabas T.A., Melnikov A.G., Ilin A.P. Sintez keramicheskikh materialov na osnove oksida magniya i alyuminiya v rezhime goreniya [Synthesis of ceramic materials on basis of oxides of magnesium and aluminum]. *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*, 2003, no. 11, pp. 14-19.
- Ilin A.P., Tolbanova L.O. Produkty goreniya smesey nanoporoshkov alyuminiya i vol'frama v vozdukh [Products of Combustion of Mixtures of Aluminium and Tungsten Nanopowders in Air]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 423-428.

Received: 21 February 2015.

УДК 541.64, 532.74, 620.184.4, 532.1.0135

СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С НАПОЛНИТЕЛЕМ – НАНОЧАСТИЦАМИ МЕДИ

Труфакина Людмила Михайловна,

канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории реологии нефти
Институт химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск,
пр. Академический, 4. E-mail: lmt@ipc.tsc.ru

Петренко Татьяна Васильевна,

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

Рябова Наталья Викторовна,

ведущ. инженер лаборатории физико-химических методов исследования
Института химии нефти СО РАН, Россия, 63402, г. Томск,
пр. Академический, 4. E-mail: rnv@ipc.tsc.ru

Актуальность работы обусловлена интересом использования полимерных композитов с наночастицами меди, обладающих рядом новых функциональных свойств. С помощью реологических методов изучены вязкоупругие свойства и свойства поверхности полимерных композитов на основе поливинилового спирта с Na-карбоксиметилцеллюлозой или полиакриламидом с добавкой в качестве наполнителя наночастиц меди.

Цель работы: получение полимерных композитов на основе водных растворов поливинилового спирта с Na-карбоксиметилцеллюлозой или полиакриламидом с добавкой тетрабората натрия и наполнителя в виде наночастиц меди; изучение их реологических и поверхностных свойств: эффективной вязкости, модуля упругости и прочности адгезии; определение степени окисления наночастиц меди с отдельными полимерами и в смеси полимеров, а также в зависимости от концентрации полимеров.

Методы исследования. Вискозиметрические исследования полимерных композитов проведены на реовискозиметре «Реотест-2»; модуль упругости определяли методом пенетрации шарообразного индентора; прочность адгезии изучали методом перпендикулярного отрыва металлического кольца от поверхности полимерного тела. ИК-спектры полимерных композитов снимали на спектрометре Nicolet 5700. Степень окисления наночастиц меди определяли на дифрактометре DS DISCOVER с Gadds (Bruker, Германия).

Результаты. Было показано, что за счет взаимного влияния компонентов смеси поливинилового спирта, Na-карбоксиметилцеллюлозы или полиакриламида с тетраборатом натрия и наночастицами меди при формировании полимерного комплекса происходит увеличение эффективной вязкости, модуля упругости и уменьшение прочности адгезии по сравнению с полимерными композициями без наполнителя-наночастицами меди. Проведена сравнительная оценка свойств исследуемых полимерных композитов. Замораживание полимерных композитов приводит к еще большему усилению исследуемых свойств. Взаимодействие компонентов данной полимерной композиции изменяет химический состав и структуру полимеров. В отличие от исходных полимеров, их смеси нерастворимы в воде. Результаты, полученные на дифрактометре, позволили определить степень окисления наночастиц меди с отдельными полимерами и в смеси полимеров, а также в зависимости от их концентрации. Использование ИК-спектрального метода показало, что возможно образование водородных связей в исследуемых композитах.

Ключевые слова:

Композиты, наночастицы, эффективная вязкость, модуль упругости, прочность адгезии.

Введение

В настоящее время для расширения свойств полимерных материалов применяют наполнители из различных материалов. Применение наполнителей в виде наночастиц открывает новые возможности для их использования. Известно, что наночастицы (НЧ) меди менее токсичны, чем ее соли, а использование новых технологий в сочетании с НЧ меди дает намного лучший эффект.

В настоящее время в литературе достаточно много сведений о методах получения НЧ меди, рассматриваются вопросы защиты от агрегации и окисления макромолекулярными экранами [1–3]. Также рассмотрены зависимости размеров НЧ, получаемых в золях, от концентрации полимера, температуры и энергии взаимодействия макромо-

лекул с поверхностью НЧ и показано, чем сильнее это взаимодействие, тем меньше размер растущей НЧ, при котором она экранируется и прекращает свой рост. Защитные экраны образуются благодаря не ковалентным взаимодействиям макромолекул с поверхностью НЧ, т. е. частицу золя можно рассматривать как комплекс полимер – НЧ [4].

Определенную роль, а в некоторых случаях и основную, в стабилизации комплекса полимер – НЧ играют гидрофобные взаимодействия. Введение гидрофобного блока в структуру макромолекул полимеров приводит к уменьшению размера образующихся НЧ и к увеличению их устойчивости к агрегации и окислению [5].

Можно предположить, что если НЧ оказываются в растворе смеси двух полимеров, способных ко-

оперативно взаимодействовать с их поверхностью, то такие системы могут вести себя по-разному. При отсутствии взаимодействия между макромолекулами полимеров НЧ могут либо распределяться между полимерными цепями разного строения, либо избирательно связываться с цепями одного из полимеров [6]. Если же макромолекулы способны взаимодействовать друг с другом с образованием интерполимерных комплексов (ИПК), то, в принципе, возможно формирование тройных комплексов, включающих НЧ в цепи двух полимеров, которые связаны друг с другом. Необходимое условие устойчивости водных золей таких комплексов – достаточно хорошая растворимость ИПК.

При восстановлении ионов меди в растворе ИПК высокомолекулярной полиакриловой кислоты (ПАК) и полиэтиленгликоля (ПЭГ) кооперативное взаимодействие макромолекулярных компонентов ИПК в водных растворах сопровождается экранированием гидрофильных групп в образовавшемся комплексе. ИПК, как правило, дифильны, благодаря тому, что структура их частиц включает как гидрофобизованные двутяжные фрагменты собственно поликомплекса, так и свободные фрагменты гидрофильных полимеров (петли, концы цепей). Было показано [7], что ИПК ПАК-ПЭГ является значительно более эффективным стабилизатором (протектором) металлических НЧ, чем полимерные компоненты этого комплекса, взятые по отдельности и что формирование частицы металлического золя, включающего НЧ металла и ИПК, сопровождается взаимным усилением комплексобразующих свойств компонентов.

Интерполимерные комплексы на основе поливинилового спирта (ПВС) с Na-карбоксиметилцеллюлозой (Na-КМЦ) и полиакриламидом (ПАА) достаточно хорошо изучены [8, 9].

Цель работы заключалась в получении полимерных композитов на основе поливинилового спирта с Na-карбоксиметилцеллюлозой или полиакриламидом с добавкой тетрабората натрия и НЧ меди в качестве наполнителя, а также определения степени окисления НЧ меди при взаимодействии с отдельными полимерами и со смесью полимеров в зависимости от их концентрации.

Экспериментальная часть.

Материалы и методика эксперимента

В работе использовали поливиниловый спирт (ПВС) марки 16/1 (г. Невинномысск). Расчет молекулярной массы ПВС проводили по формуле $[\eta]=8,86 \cdot 10^{-4} \cdot M^{0,72}$ [10] при 20 °С, $M=2 \cdot 10^5$. Водные растворы ПВС готовили суспендированием в рассчитанном количестве дистиллированной воды, перемешивали и оставляли на ночь при комнатной температуре, затем нагревали смесь на кипящей водяной бане до полного растворения полимера.

Молекулярную массу Na-КМЦ определяли по уравнению $[\eta]=0,233 \cdot 10^{-3} \cdot M^{1,28}$ в 2 % водном растворе NaCl при 20 °С, $M=3,63 \cdot 10^6$. При приготовлении водных растворов Na-КМЦ полимер зали-

вали рассчитанным количеством воды, оставляя для набухания на сутки, затем перемешивали с помощью магнитной мешалки до однородного состояния.

В работе использовали образцы ПАА (Обнинск), расчет молекулярной массы проводили по формуле $[\eta]=3,73 \cdot 10^{-4} \cdot M^{0,66}$ при 30 °С, $M=4,8 \cdot 10^5$.

Из зависимости логарифма характеристической вязкости от объемной концентрации водных растворов полимеров определены критические концентрации кроссоверов, которые составляют для ПВС $c_{кр}=7$ %, для Na-КМЦ $c_{кр}=5$ % и для ПАА $c_{кр}=1,35$ %.

Наночастицы меди получены методом электрического взрыва проводника в атмосфере аргона и затем упакованы в стеклянные ампулы в инертной атмосфере.

Порошок содержит металлическую медь (Cu) около 98 % мас., остальное – другие химические элементы. При контакте с воздухом содержание активного металла падает до 85–90 %, остальное: сорбированные газы, оксид меди и H₂O.

Полимерные композиции готовили при температуре +20 °С из водных растворов ПВС, Na-КМЦ или ПАА с концентрацией равной $C_{крит}$ в соотношении 1:1 с добавлением водного раствора ТБН в количестве 1/10 от количества полимерного композита, при перемешивании с помощью магнитной мешалки в течение 10 минут. В раствор одного из полимеров добавляли 10 % НЧ меди от веса полимерного композита.

Эффективную вязкость растворов определяли с использованием реовискосиметра «Реотест-2», на устройстве цилиндр–цилиндр. В табл. 1 приведены значения эффективной вязкости и напряжения сдвига для водных растворов Na-КМЦ, ПАА и ПВС при T=20 °С.

Эффективную вязкость полимерных композитов определяли на устройстве конус–плита при скорости сдвига от 0,56 до 4800 с. По изменению сдвигающего напряжения τ и скорости сдвига D проводили вычисление эффективной вязкости: $\eta=(\tau/D)100$, где η – эффективная вязкость (Па·с); τ – сдвиговое напряжение (10⁻¹ Па); D – скорость сдвига (с⁻¹).

Модуль упругости (E) определяли методом пенетрации шарообразного индентора [11], т. е. измерением глубины его внедрения под нагрузкой в упругие тела, что фактически дает значение модуля. Расчет модуля упругости проводили по формуле: $E=3F/16h^{3/2}R^{1/2}$, где F – сила, действующая на индентор; h – глубина внедрения (м) шарообразного индентора радиуса R (м) в плоскую поверхность образца.

Адгезионную прочность полимерных композитов измеряли методом перпендикулярного отрыва металлического кольца от поверхности полимерного композита [12, 13]. Расчет работы сил адгезии проводили по формуле: $W_{отр}=F_{отр}/S$, где S – площадь контакта адгезива с субстратом (м²); $F_{отр}$ – адгезия отрыва (Н/м⁻¹).

ИК-спектры полимерных композитов снимали на ИК-Фурье спектрометре «Nicolet 5700» (Центр коллективного пользования ТФ СО РАН).

Для определения степени окисления наночастиц меди в полимерных композитах использовали дифрактометр DS DISCOVER с Gadds (Bruker, Германия).

Результаты и обсуждение

Таблица 1. Значения эффективной вязкости (η) и напряжения сдвига (τ) для водных растворов Na-КМЦ, ПАА и ПВС при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Table 1. Values of the effective viscosity (η) and shift voltage (τ) for water solutions of Na-carboxymethylcellulose (Na-CMC), polyacrilamide (PAA) and polyvinyl alcohol (PVA)

КМЦ, % CMC, %	η, мПа·с η, mPa·s		τ, Па τ, Pa		ПАА, % PAA, %	η, мПа·с η, mPa·s		τ, Па τ, Pa		ПВС, % PVA, %	η, мПа·с η, mPa·s		τ, Па τ, Pa	
	η, мПа·с η, mPa·s	τ, Па τ, Pa	η, мПа·с η, mPa·s	τ, Па τ, Pa		η, мПа·с η, mPa·s	τ, Па τ, Pa	η, мПа·с η, mPa·s	τ, Па τ, Pa					
4	0,175	28,45	0,5	0,16	26,34	4	0,14	22,76						
5	0,561	91,04	1	0,27	41,45	5	0,21	34,14						
6	0,597	96,73	2	0,38	66,31	6	0,31	51,21						
7	0,667	108,1	3	0,47	78,12	7	0,42	69,28						
8	0,772	125,1				8	0,56	91,04						

Известно [14], что водный раствор ПВС легко превращается в гидрогель при добавлении тетрабората натрия вследствие образования межмолекулярного хелатного соединения при взаимодействии гидроксильных групп полимера с борат-ионами. Для увеличения количества внутримолекулярных связей к смеси полимеров добавляли по каплям 1 %-й водный раствор ТБН в соотношении 1:10 при $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. После получения однородной прозрачной композиции и выдержки в течение 1 часа проводили измерения эффективной вязкости, модуля упругости и прочности адгезии. Полученные полимерные композиты оказались более вязкими, с большим модулем упругости, видимо, за счет не только межмолекулярных водородных связей, но и внутримолекулярных.

Композиции с наполнителем готовили, добавляя НЧ меди в водный раствор ПВС при перемешивании в количестве 10 % от массы ИПК, далее добавляли раствор Na-КМЦ или ПАА и ТБН.

Часть образцов подвергали замораживанию и дальнейшему размораживанию. Известно, что замораживание концентрированных водных растворов ПВС, их выдерживание в этом состоянии и последующее оттаивание приводит к образованию анизотропных гелей, называемых криогелями. Криогели обладают микропористой структурой, сочетающейся с высокой жесткостью, хорошей термостойчивостью, биосовместимостью и рядом других характеристик, полезных для применения этих композитов на практике [15].

В качестве показателей структурно-механических свойств полимерных композитов использовали значения эффективной вязкости, модуля упругости и адгезионной прочности.

На рис. 1 показаны зависимости эффективной вязкости полимерных композитов ПВС с Na-КМЦ и ТБН без наполнителя и с наполнителем в виде НЧ меди от времени структурообразования и температуры. Измерения проводились в течение 15 суток. Из данных видно, что в течение этого времени происходит изменение эффективной вязкости, которая увеличивалась для всех ПК, больше всего для ПК с НЧ меди от 3,14 до 4,31 мПа·с, далее же происходит незначительное увеличение измеряемых величин.

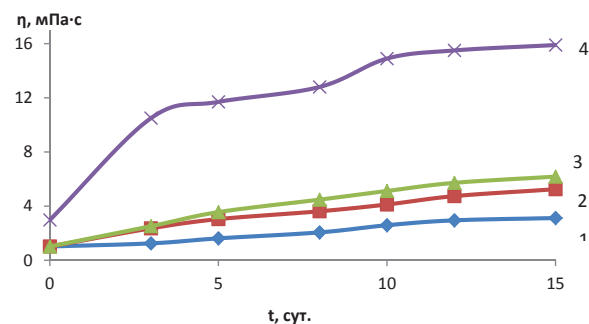


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости от времени структурообразования ПК на основе поливинилового спирта – натрий-карбоксиметилцеллюлоза – тетраборат натрия при температурах ($^{\circ}\text{C}$): 1) $+20$; 2) -15 ; 3) -30 , без наполнителей и с НЧ меди (4)

Fig. 1. Dependence of the effective viscosity on the time of structure formation of the polymer complex (PC) on the basis of polyvinyl alcohol – sodium-carboxymethylcellulose – sodium tetraborate at: 1) $+20$; 2) -15 ; 3) $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, without fillers and with copper nanoparticles (4)

Динамику изменения модуля упругости данных ПК можно проследить с течением времени. На рис. 2 показаны зависимости модуля упругости полимерных композитов ПВС–Na-КМЦ–ТБН без наполнителя и с наполнителем в виде НЧ меди от времени структурообразования и температуры. Наибольшее увеличение модуля упругости наблюдается для композита с наполнителем НЧ меди, от 12,74 до 31,84 кПа.

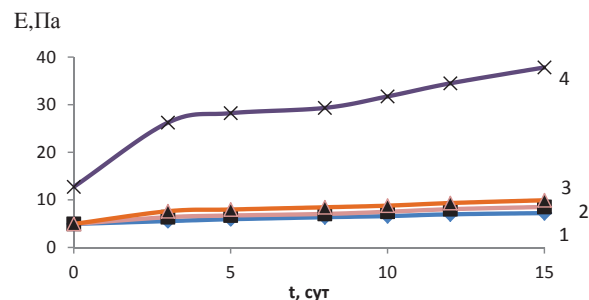


Рис. 2. Зависимость модуля упругости Юнга от времени структурообразования ПК на основе поливинилового спирта – натрий-карбоксиметилцеллюлоза – тетраборат натрия при температурах ($^{\circ}\text{C}$): 1) $+20$; 2) -15 ; 3) -30 , без наполнителей и с НЧ меди (4)

Fig. 2. Dependence of the Young elasticity module on the time of structure formation of the PC on the basis of polyvinyl alcohol – sodium-carboxymethylcellulose – sodium tetraborate at: 1) $+20$; 2) -15 ; 3) $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, without fillers and with copper nanoparticles (4)

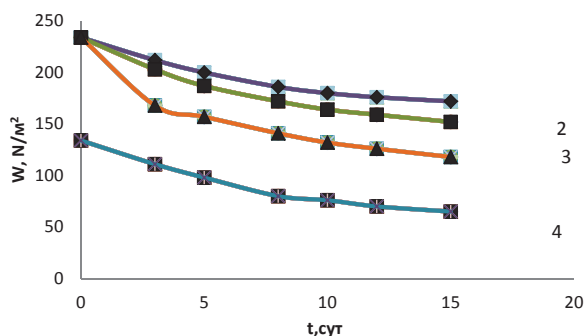


Рис. 3. Зависимость прочности адгезии от времени структурообразования ПК на основе поливинилового спирта – натрий-карбоксиметилцеллюлоза – тетраборат натрия при температурах (°C): 1) +20; 2) –15; 3) –30, без наполнителей и с НЧ меди (4)

Fig. 3. Dependence of the adhesion on the time of structure formation of the PC on the basis of polyvinyl alcohol – sodium-carboxymethylcellulose – sodium tetraborate at: 1) +20; 2) –15; 3) –30 °C, without fillers and with copper nanoparticles (4)

Вклад поверхностных молекул в адгезионное взаимодействие является определяющим [16]. В формировании адгезии может принимать участие водородная связь. На начальной стадии взаимодействия между субстратом и адгезивом взаимодействуют сами полимеры, поскольку имеется широкий набор водородных связей различной прочности, такие водородные связи имеют место при сольватации гидроксила ПВС несколькими молекулами воды. Водные растворы ПВС содержат большое количество воды, происходит образование и разрыв водородных связей полимер–полимер и полимер–вода, их влияние на структуру полимера представляет значительный интерес [17, 18].

С увеличением вязкости ПК прочность адгезии уменьшается, так как имеет место релаксация внутренних напряжений, что связано с изменением структуры адгезива [19].

Таким образом, при взаимодействии растворов ПВС с Na-КМЦ или ПАА с концентрациями, равными $S_{крит}$, происходит увеличение эффективной вязкости, модуля упругости и снижение прочности адгезии, что подтверждается образованием новых водородных связей. Свой вклад в изменение свойств полимерных комплексов вносит понижение температуры до –15 и –30 °C и конкуренция взаимодействия полимер–полимер и полимер–растворитель. В смеси полимеров образуется смешанная система Н-связей.

Анализ результатов, полученных на дифрактометре, показал, что степень окисления меди меняется. Так, в водном растворе ПВС с НЧ меди содержалось (%): Cu – 78,1; Cu₂O – 6,4; CuO – 15,5, после заморозки и размораживания состав изменился незначительно (%): Cu – 76,8; Cu₂O – 7,6; CuO – 15,6. При добавлении НЧ меди к раствору ПАА (%): Cu – 83,9; Cu₂O – 4,8; CuO – 11,2. Более всего НЧ меди оказались подверженными окислению в растворе Na-КМЦ (%): Cu – 16,2; Cu₂O – 55,7; CuO – 28,1.

Таким образом, оказалось, что в растворах полимеров ПВС и ПАА происходит незначительное окисление наночастиц меди, кроме Na-КМЦ, где наблюдается наиболее стабильная степень окисления 2⁺, соответствующая чёрному оксиду CuO и голубому гидроксиду Cu(OH)₂, который при стоянии легко отщепляет воду и при этом чернеет.

Таблица 2. Изменения эффективной вязкости (η , кПа·с), модуля упругости (E , кПа) и адгезионной прочности (W , Н/м²) при ПК на основе ПАА–ПВС–ТБН–Cu (при +20, –15 и –30 °C) в зависимости от времени структурообразования

Table 2. Change of the effective viscosity (η , kPa·s), the elasticity module (E , kPa) and adhesion strength (W , N/m²) at PC on the basis of PAA–PVA–ST–Cu (at +20, –15 and –30 °C) depending on time of structure formation

t, сут. t, day	+20			–15			–30		
	η , кПа·с	E , кПа	W , Н/м ²	η , кПа·с	E , кПа	W , Н/м ²	η , кПа·с	E , кПа	W , Н/м ²
0	1,33	3,14	352	1,33	3,14	352	1,33	3,14	352
3	1,45	3,60	313	2,18	4,57	249	2,73	5,25	228
5	1,58	3,81	302	2,64	4,95	232	3,15	5,78	207
8	1,83	3,97	285	3,13	5,45	218	3,78	6,34	188
10	2,15	4,09	273	3,32	5,83	200	4,05	6,58	172
12	2,38	4,22	268	3,51	5,94	193	4,39	7,03	162
15	2,52	4,31	258	3,76	6,14	187	4,67	7,23	156

Таблица 3. Изменения эффективной вязкости (η , мПа·с) ПК Na-КМЦ–ПВС–ТБН–Cu, модуля упругости (E , Па·10^{–4}) и работы сил адгезии (W , Н/м²) в зависимости от времени структурообразования и температуры

Table 3. Change of the effective viscosity (η , kPa·s) of the PC Na-CMC–PVA–ST–Cu, the elasticity module (E , kPa) and adhesion strength (W , N/m²) depending on time of structure formation

t, сут. t, day	+20			–15		
	η , мПа·с	E , Па·10 ^{–4}	W , Н/м ²	η , мПа·с	E , Па·10 ^{–4}	W , Н/м ²
0	2,98	12,740	134	2,98	12,740	134
3	3,02	26,245	111	10,52	16,600	127
5	3,15	28,238	98	10,83	19,051	116
8	3,65	29,331	80	11,52	20,827	109
10	3,96	31,741	76	12,15	23,665	101
12	4,53	34,500	70	15,56	25,335	96
15	5,22	37,684	65	15,93	26,245	87

Для выяснения влияния концентрации полимерных растворов на степень окисления НЧ меди, концентрацию исходных полимеров увеличивали до 10 % для Na-КМЦ, 3 % ПАА и до 10 % для ПВС. При смешивании смеси растворов с концентрацией равной Скрит, ПВС и ПАА с НЧ меди образуется комплекс черно-зеленого цвета, с более устойчивой степенью окисления 2⁺, которая даёт соли синего и сине-зелёного цвета и черный оксид меди. Результаты, полученные на дифрактометре для полимерного

композита ПАА–ПВС–Cu, показали следующий состав (%): Cu – 86,15; Cu₂O – 4,41; CuO – 9,44, аморфность составляет 33 %. В такой же по составу смеси, но с увеличенной вдвое концентрацией ПАА до 3 % и ПВС до 10 % оказалось Cu – 45,62 %, Cu₂O – 49,12 %, CuO – 5,26 %, аморфность составляет 61,5 %. Оказалось, что степень окисления НЧ меди увеличивается в более концентрированных растворах этих полимеров, аморфность полимерного композита также возрастает. Судя по измерениям эффективной вязкости и модулю упругости для этой смеси полимеров с НЧ меди формируется более слабый композит, чем с ПВС–Na-КМЦ–Cu.

В водных смесях полимерных растворов ПВС–ПАА с НЧ меди больше половины комплекса состоит из оксида меди лилово-коричневого цвета (степень окисления 1⁺). Видимо, смесь этих полимеров оказывает стабилизирующее действие на НЧ меди, которое можно объяснить тем, что комплекс этих полимеров взаимодействует с НЧ меди, формируя на их поверхности защитные экраны.

В смесях с Na-КМЦ и ПВС, взятых в концентрации, равной критической, наблюдался следующий состав (%): Cu – 35, Cu₂O – 62, CuO – 0, аморфность составляет 33 %.

В смесях более концентрированных растворов состава (%): КМЦ – 10 и ПВС – 10, содержание различных форм меди составляет (%): Cu – 80, Cu₂O – 8, CuO – 11,9, аморфность составляет 85 %. В этом случае в более концентрированных растворах этих полимеров НЧ меди окисляются меньше, но больше аморфность полимерного композита.

Как было отмечено выше, образование полимерных композитов с НЧ меди приводит к увеличению эффективной вязкости, модуля упругости и снижению адгезионной прочности, т. е. имеет место проявление синергизма (взаимного усиления комплексобразующей способности наночастиц и комплементарных полимеров).

Попытки показать образование Н-связей на ИК-спектрах классическим методом на «пропускание» (ИК-Фурье спектрометр Nicolet 5700) оказались безуспешными из-за большой толщины пленок. Чтобы не нарушать структуру пленок ИК-спектры получали с применением приставки однократного нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с кристаллом ZnSe. При регистрации спектров НПВО вводилась поправка, учитывающая глубину проникновения излучения в зави-

симости от длины волны.

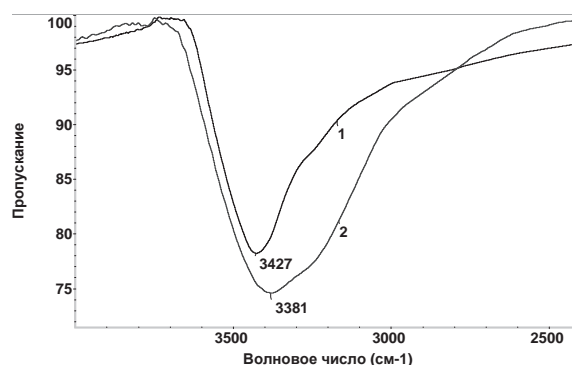


Рис. 4. Спектры ИК полимерного композита на основе поливинилового спирта – натрий-карбоксиметилцеллюлоза – тетраборат натрия через сутки после приготовления (1) и через 15 суток (2)

Fig. 4. IR spectra of the polymer composite on the basis of Na-carboxymethylcellulose –sodium tetraborate in a day after preparation (1) and in 15 days (2)

Из спектров видно, что полоса поглощения валентных колебаний группы ОН уширяется, форма полосы при температуре +20 °С ассиметрична. Это можно объяснить образованием новых ассоциатов и перераспределением водородных связей по мере увеличения эффективной вязкости и модуля упругости, что соответствует увеличению количества водородных связей.

Выводы

1. Показано, что происходит образование интерполимерных комплексов на основе поливинилового спирта с натрий карбоксиметилцеллюлозой или полиакриламидом и тетраборатом натрия с наночастицами меди, которое сопровождается взаимным усилением комплексобразующих свойств компонентов, увеличением эффективной вязкости и модуля упругости.
2. Установлено, что полимерные композиты на основе поливинилового спирта с натрий карбоксиметилцеллюлозой или полиакриламидом являются значительно более эффективными стабилизаторами (протекторами) металлических частиц, чем полимерные компоненты этих комплексов, взятые в отдельности. Экранирование интерполимерным композитом поверхности наночастиц меди значительно повышает их устойчивость к окислению.
4. Особенности нестехиометрических нтерполимерных комплексов полиакриловой кислоты и полиэтиленгликоля как протекторов наночастиц меди в водных золях / Г.Ю. Остаева, И.М. Паписов, Д.Е. Арбузов, Г.И. Паписова // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2013. – Т. 55. – № 4. – С. 412–416.
5. Псевдоматричный синтез наночастиц меди в растворе смеси полиакриловой кислоты и плороника / Г.Ю. Остаева, Е.Д. Селищева, В.Д. Паутов, И.М. Паписов // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. – 2008. – Т. 50. – № 6. – С. 1102–1106.
6. Остаева Г.Ю., Селищева Е.Д., Паписов И.М. Конкуренция макромолекул полиэлектролита и мицелл амфифильного полимера

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirai Y., Toshima N. Tailored Metal Catalysis // ed. by Y. Iwasawa. – Tokyo: D. Reidel Publ. Comp., 1986. – P. 87–105.
2. Hirai Y., Toshima N. Polymeric Materials Encyclopedia // ed. by J.C. Salamone. – Tokyo: Boca Raton CRC Press, 1996. – V. 2. – P. 1310–1321.
3. Литманович О.Е. Закономерности взаимодействия макромолекул с наночастицами металлов и псевдоматричный синтез золь полимер-металлических нанокомпозитов // Высокомолекулярные соединения. Сер.С.– 2008. – Т. 50. – № 7. – С. 1370–1396.

- при взаимодействии с наночастицами меди // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. – 2007. – Т. 50. – № 1. – С. 130–135.
7. Взаимное усиление комплексообразующих свойств компонентов в тройных системах, включающих наночастицы меди, полиакриловую кислоту и полиэтиленгликоль / Г.Ю. Остаева, И.М. Паписов, Е.Д. Селищева, Д.Е. Арбузов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2010. – Т. 52. – № 2. – С. 336–340.
 8. Наполненная вязкоупругая гелеобразная композиция: пат. Рос. Федерации № 2280658. Заявл. 22.03.04; опубл. 27.07.06. Бюл. № 21. – 67 с.
 9. Труфакина Л.М., Кудешова Е.Г. Реологические свойства смесей полуразбавленных и концентрированных растворов поливинилового спирта и карбоксиметилцеллюлозы // Инженерно-физический журнал. – 2003. – № 76 (3). – С. 55–58.
 10. Энциклопедия полимеров / под ред. В.А. Каргина. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1972. – Т. 1. – С. 954; – 1974. – Т. 2. – С. 790.
 11. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия, 1978. – 310 с.
 12. Зимон А.Д. Адгезия плёнок и покрытий. – М.: Химия. 1977. – 352 с.
 13. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. – М.: Химия. 1974. – 391 с.
 14. Лозинский В.И. Криотропное гелеобразование растворов поливинилового спирта // Успехи химии. – 1998. – Т. 67. – № 7. – С. 641–655.
 15. Ушаков С.Н. Поливиниловый спирт и его производные. Т. 1. – М.; Л.: Изд-во АН СССР. – 1960. – 324 с.
 16. Получение композиции целлюлоза-оксид железа (II, III) и исследование ее термических твердофазных превращений / И.А.Башмаков, Т.Ф. Тихонова, Л.И. Соловьева // Журнал прикладной химии. – 2008. – Т. 81. – Вып. 11. – С. 1882–1886.
 17. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Основные направления фундаментальных ориентированных исследований в области наноматериалов // Успехи химии. – 2009. – Т. 78. – № 9. – С. 867–887.
 18. Остаточная вода в поливинилово спирте / Р.Р. Хасбиуллин, Ю.В. Костина, Т.Ф. Петрова // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2014. – Т. 58. – № 5. – С. 491–500.
 19. Фельдштейн М.М. Адгезионные гидрогели: структура, свойства и применение // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2004. – Т. 46. – № 11. – С. 1905–1936.

Поступила 19.02.2015 г.

UDC 541.64, 532.74, 620.184.4, 532.1.0135

PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES ON THE BASIS POLYVINYL ALCOHOL WITH NANOPARTICLES OF COPPER

Lyudmila M. Trufakina,

Institute of Petroleum Chemistry of SB RAS,
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: lmt@ipc.tsc.ru

Tatiana V. Petrenko,

Institute of Petroleum Chemistry of SB RAS,
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: Unikon@ipc.tsc.ru

Natalya V. Ryabova,

Institute of Petroleum Chemistry of SB RAS, 4, Akademicheskoy Avenue,
Tomsk, 634021, Russia. E-mail: rnv@ipc.tsc.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the increase interest of obtaining and using polymer composites with copper nanoparticles, possessing a number of specific properties for biomedicine researches like materials for tissues and cell engineering, medicine substance with control of secrete of drugs, in electronic and another fields of technics. The paper demonstrates the possibility of getting polymer composites on basis polyvinyl alcohol, Na-carboxymethyl cellulose or poly (acryl amid) and natrium tetraborate using copper nanoparticles.

The main aim of the study is to obtain the polymer composites on the basis of water solutions of polyvinyl alcohol and Na-carboxymethyl cellulose or poly (acryl amid) with additives of sodium tetraborate and filler in the form of copper nanoparticles; to study their rheological and surface properties: effective viscosity, module elasticity and strength adhesion; to determine the oxidation level of copper nanoparticles with separate polymers and in the mixture with polymers as well as depending on polymer concentration.

The methods used in the study. Viscosimetric study of polymer composites was realized on rheoviscosimeter Rheotest-2, the elasticity module was defined by the method of spherical indenter penetration; the adhesion strength was studied by the method of metal ring perpendicular separation from the polymer body surface. The IR-spectra were recorded at the spectrometer Nicolet 5700. The oxidation degree of copper nanoparticles was determined by diffractometer DS DISCOVER with Gadds (Bruker, Germany).

The results. It was shown for the first time that due to interdependent influence of the mixture components: polyvinyl alcohol, Na-carboxymethyl cellulose or poly (acryl amid) with sodium tetraborate and copper nanoparticles at formation of polymeric complex the effective viscosity and the elasticity module increase, the strength adhesion decreases in comparison with initial polymers. The authors have carried out the comparative evaluation of the properties of the polymer compositions under study. Freezing of polymer compositions leads to large strengthening of the properties under study. Interaction of components of this polymer composition changes chemical compositions and structure of polymers. In contrast with the initial polymers, their mixtures are insoluble in water. The results obtained on diffractometer allow determining the oxidation level copper nanoparticles with separate polymers and in mixture of polymers and depending on their concentration.

Key words:

Composition, nanoparticles, dynamic viscosity, module of elasticity, adhesion.

REFERENCES

- Hirai Y., Toshima N. *Tailored Metal Catalysis*. Ed. by Y. Iwasawa. Tokyo, D. Reidel Publ.Comp., 1986. 87 p.
- Hirai Y., Toshima N. *Polymeric Materials Encyclopedia*. Ed. by J.C. Salamone. Tokyo, Boca Raton CRC Press, 1996. V. 2, 1310 p.
- Litmanovich O.E. Zakonomernosti vzaimodeystviya molekul s nanochastitsami metallov i psevdomatrichny sintezpolimer-metallicheskih nanokompozitov [Macromolecule interaction with metal nanoparticles and pseudo-matrix synthesis of polymer-metal nanocomposites]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. C, 2001, vol. 50, no. 7, pp. 1370–1396.
- Ostaeva G.Yu., Papisov I.M., Arbuzov D.E., Papisova G.I. Osnovnyye nestekhiometricheskikh interpolimernykh kompleksov poliakrilovoy kisloty i polietilenglikolya kak protektorov nanochastits medi v vodnykh zolyakh [Features of non-stoichiometric complexes of polyacrylic acid and polyethyleneglycol as protectors of copper nanoparticles in water zoles]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. B, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 412–416.
- Ostaeva G.Yu., Selisheva E.D., Pautov V.D., Papisov I.M. Psevdomatrichny sintez nanochastits medi v rastvore smesi poliakrilovoy kisloty i plyuronika [Pseudo-template synthesis of copper nanoparticles in solutions of poly (acrylic acid)-pluronic blends]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. B, 2008, vol. 50, no. 6, pp. 1102–1106.
- Ostaeva G.Yu., Selisheva E.D., Papisov I.M. Konkurentsiya makromolekul polielektrolita i mitsell anfilnogo polimera pri vzaimodeystvii s nanochastitsami medi [Competitiveness of macromolecules of polyelectrolyte and micella polymer at interaction with copper nanoparticles]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. B, 2007, vol. 49, no. 1, pp. 130–135.
- Ostaeva G.Yu., Papisov I.M., Selisheva E.D., Arbuzov D.E. Vzaimnoe usilenie kompleksobrazuyushchikh svoystv komponentov v troynykh sistemakh, vklyuchayushchikh nanochastitsy medi, poliakrilovuyu kislotu i polietilenglikol [Reinforcement of the components complexable properties in triple systems including copper nanoparticles, polyacrylic acid and polyethyleneglycol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. B, 2010, vol. 52, no. 2, pp. 336–340.
- Trufakina L.M. *Napolnennaya vyazkouprugaya geleobraznaya kompozitsiya* [Filled visco-elastic gel-like composite]. Patent RF no. 2280658, 2006.
- Trufakina L.M., Kudeshova E.G. Reologicheskie svoystva smesi polurazbavlenykh i kontsentririrovannykh rastvorov polivinilovogo spirta i karboksimetiltsetyulozy [Rheological properties of the mixture of semidiluted and concentrated solutions of polyvinyl alcohol and CM cellulose]. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal*, 2003, vol. 76, no. 3, pp. 55–58.
- Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]. Ed. by V.A. Kargin. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1972. Vol. 1, 954 p.; 1974, vol. 2, 790 p.
- Nilsen L. *Mekhanicheskie svoystva polimerov i polimernykh kompozitsiy* [Mechanical properties of polymers and polymeric compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 1078 p.
- Zimon A.D. *Adgeziya plenok i pokrytiy* [Adhesion of films and covers]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 352 p.
- Berlin F.F., Basin B.E. *Osnovy adgezii polimerov* [Fundamentals of polymer adhesion]. Moscow, Khimiya, 1974. 391 p.
- Lozinsky V.I. Kreotropnoe geleobrazovanie rastvorov polivinilovogo spirta [Cryotropic gelling of polyvinyl alcohol solutions]. *Uspekhi khimii*, 1998, vol. 67, no. 7, pp. 641–655.
- Ushakov S.N. *Polivinilovyy spirt i ego proizvodnye* [Polyvinyl alcohol and its derivatives]. Moscow, Leningrad, AN USSR Press, 1960. Vol. 1, 324 p.
- Bashmakov I.A., Tikhonova T.F., Soloveva L.V. Poluchenie kompozitsii tsellyuloza – oksid zheleza (II, III) i issledovanie ee termicheskikh tverdogaznykh prevrashchenii [Obtaining compositions of cellulose – iron oxide (II, III) and investigation of its thermal solid-phase conversions]. *Journal of Applied Chemistry*, 2008, vol. 81, no. 11, pp. 1882–1886.
- Tretykov Yu.D., Gudilin E.A. Osnovnye napravleniya fundamentalnykh i orientirovannykh issledovaniy v oblasti nanomaterialov [The main directions of fundamental and oriented studies in the field of nanomaterials]. *Uspekhi khimii*, 2009, vol. 78, no. 9, pp. 867–887.
- Hasbiullin R.R., Kostina Yu.V., Petrova T.F. Ostatochnaya voda v polivinilovom spirte [residual water in polyvinyl alcohol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. A, 2014. vol. 58, no. 5, pp. 491–500.
- Feldshtein M.M. Adgezionnye gidrogeli: struktura, svoystva i primenenie [Adhesiv hydrogels: structure, properties and application]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, Ser. A, 2004, vol. 46, no. 11, pp. 1905–1936.

Received: 19 February 2015.

УДК 66.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ АММИАКА И МЕТИЛАМИНОВ ВОДОЙ НА НОВОЙ РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКЕ

Андреев Матвей Викторович,

аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств»
ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная техническая академия»,
Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60. E-mail: balchug@mail.ru

Скачков Илья Владимирович,

аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств»
ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная техническая академия»,
Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60. E-mail: Iliya_8_7@mail.ru

Бальчугов Алексей Валерьевич,

д-р техн. наук, проректор по научной работе ФГБОУ ВПО
«Ангарская государственная техническая академия», Россия, 665835,
г. Ангарск, ул. Чайковского, 60. E-mail: balchug@mail.ru

Коробочкин Валерий Васильевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры общей химической технологии
ФГБОУ ВПО «НИ Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: vkorobochkin@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена отсутствием математического описания процесса абсорбции аммиака и метиламинов из многокомпонентных газовых смесей на регулярных насадках.

Цель исследования: разработать математическую модель и методику расчета для процесса абсорбции аммиака и метиламинов из смеси газов на новой регулярной ленточной насадке.

Методы исследования. Дифференциальные уравнения математической модели, включающие уравнения материального баланса и уравнения массопередачи, решены численным методом.

Результаты. Выполнены расчеты объемных коэффициентов массопередачи в слое регулярной ленточной насадки и в слое колец Рашига при абсорбции аммиака из газовой смеси. Установлено распределение концентраций компонентов по высоте слоя насадки, и выполнен сравнительный анализ массообменной эффективности абсорбции смеси аммиака и аминов на регулярной и кольцевой насадках. Показано, что объемный коэффициент массопередачи аммиака на кольцах Рашига в 1,2 раза ниже, чем на ленточной регулярной насадке с равным эквивалентным диаметром, а коэффициент массопередачи на хордовой насадке в 1,72 раза ниже, чем на регулярной ленточной насадке. При замене колец Рашига на ленточную регулярную насадку при одинаковом режиме работы колонны и равной высоте слоя насадки концентрация аммиака и метиламинов в газовой фазе на выходе из абсорбера снижается на 10 %. При снижении коэффициента избытка расхода жидкости с 3 до 2 на кривой изменения концентрации триметиламина в газе по высоте слоя насадки появляется экстремум. Это можно объяснить относительным снижением скорости абсорбции триметиламина из-за уменьшения расхода воды и повышения ее температуры.

Ключевые слова:

Абсорбция, насадка, массообмен, моделирование, аммиак, метиламины.

Введение

Одним из важных методов получения метиламинов является каталитическое аминирование метанола в паровой фазе под давлением. Данный процесс сопровождается выбросами технологических газов, которые необходимо улавливать в абсорберах с последующей утилизацией. В насадочных абсорберах из газовой смеси с помощью абсорбента извлекаются аммиак и метиламины (монометиламин, диметиламин, триметиламин). В настоящее время установленный на ОАО «АНХК» (г. Ангарск) абсорбер, заполненный кольцами Рашига (50×50×5), не обеспечивает требуемую степень очистки газа, в результате чего концентрация аммиака и метиламинов на выходе из аппарата составляет более 20 г/м³. Причиной низкой эффектив-

ности абсорбера является недостаточно развитая поверхность контакта фаз и низкая равномерность распределения жидкости в слое насадки. С целью увеличения эффективности очистки газов предложено заменить кольцевую насадку на новую ленточную регулярную насадку [1]. В связи с этим задача количественного определения интенсивности массопередачи на новой ленточной насадке является актуальной. Однако проведение экспериментов по абсорбции многокомпонентной газовой смеси в лабораторных условиях представляет большие сложности. Они связаны с трудностью подготовки большого количества исходной многокомпонентной газовой смеси заданной концентрации и затруднительностью обеспечения ее непрерывной подачи в колонну со стабильным расходом, с

необходимостью обеспечения безопасности при работе с несколькими ядовитыми газами, со сложностью выполнения химических анализов отбираемых многокомпонентных проб и т. д. Задача определения интенсивности массообмена на ленточной насадке может быть решена с помощью математического моделирования процесса и разработки методики расчета. Помимо интенсивности процесса математическое моделирование позволит установить распределение концентраций компонентов в газе и жидкости по высоте слоя насадки, которое непосредственно зависит от интенсивности процессов массопереноса. Анализ характера распределения концентраций может служить основой для разработки рекомендаций по выбору наиболее эффективных технологических режимов эксплуатации абсорбционных колонн.

Целью работы является определение интенсивности массопереноса при абсорбции многокомпонентной газовой смеси в слое регулярной ленточной насадки и изучение распределения концентраций компонентов по высоте слоя насадки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить методику и математическую модель для расчета интенсивности массопереноса и распределения концентраций компонентов при абсорбции многокомпонентной газовой смеси в слое регулярной ленточной насадки.
2. Проверить адекватность предложенной модели.
3. Разработать рекомендации по выбору наиболее эффективных технологических режимов эксплуатации абсорбционных колонн.

Результаты и их обсуждение

Схема действующего абсорбера представлена на рис. 1. Он представляет собой вертикальную колонну – 1, заполненную насадкой – 4. В верхней части колонны установлено распределительное устройство – 2 для ввода абсорбента (вода). Исходная газовая смесь подается в нижнюю часть абсорбера через распределительное устройство – 3 и движется по колонне снизу вверх, противотоком по отношению к жидкому абсорбенту. Абсорбент (вода) контактирует на поверхности насадки с газовой фазой, поглощая аммиак и метиламины.

Конструкция новой ленточной регулярной насадки приведена на рис. 2. Насадка состоит из каркаса, изготовленного из стержней, и лент [1].

Эффективность массообмена в слое насадки характеризуется объемным коэффициентом массопередачи [2–4]. Предлагаемая методика расчета объемного коэффициента массопередачи основана на учете уравнений материального и теплового баланса, уравнений массоотдачи в газовой и жидкой фазах [5], эмпирических критериев уравнений массоотдачи [6], уравнений для определения высоты и числа единиц переноса и уравнения для расчета объемного коэффициента массопередачи.

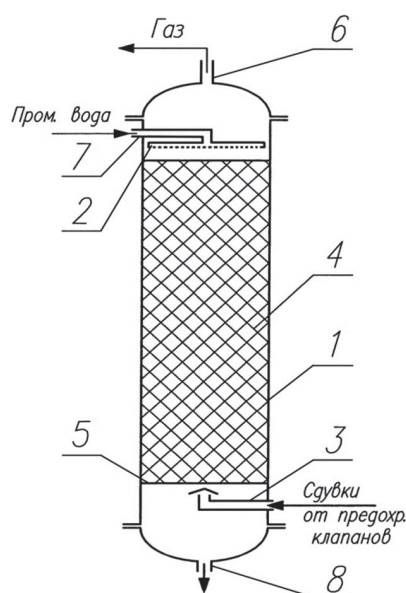


Рис. 1. Схема абсорбера: 1 – колонна; 2 – распределительное устройство для жидкости; 3 – распределительное устройство «грибкового» типа для газа; 4 – насадка; 5 – решетка; 6 – штуцер отвода газа; 7 – штуцер ввода воды; 8 – штуцер для вывода жидкости

Fig. 1. Absorber diagram: 1 is the column; 2 is the liquid distribution device; 3 is the distribution device of the «fungal» type for gas; 4 is the nozzle; 5 is the lattice; 6 is the gas removal nozzle; 7 is the water input nozzle; 8 is the liquid output nozzle

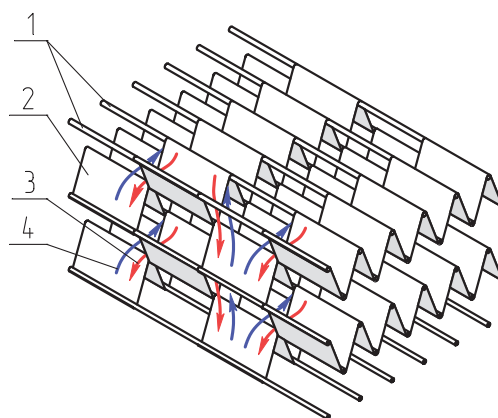


Рис. 2. Схема ленточной насадки: 1 – прутья каркаса; 2 – ленты; 3 – жидкая фаза; 4 – газовая фаза

Fig. 2. Diagram of the belt nozzle: 1 are the stays; 2 are the belts; 3 is the liquid phase; 4 is the gas phase

Исходными данными для расчета являются следующие показатели: внутренний диаметр колонны $d=2,8$ м; расход газа на входе в колонну при н.у. $V_n=500$ м³/ч; температура воды на входе в колонну $t_n=20$ °С; температура газа на входе в колонну: $t_r=20$ °С; абсолютное давление в колонне: $P=100$ кПа. Состав газовой смеси на входе в колонну приведен в табл. 1. Технические характеристики новой регулярной ленточной насадки приведены в табл. 2.

Таблица 1. Состав газовой смеси на входе в колонну

Table 1. Gas mixture composition at the column entry

Компонент Component	Содержание, об. % Content, rev. %
Аммиак/Ammoia	35
Монометиламин/Monomethylamine	10
Диметиламин/Dimethylamine	10
Триметиламин/Trimethylamine	5
Азот/Nitrogen	30
Метан/Methane	5
Оксид углерода/Carbon oxide	5

Таблица 2. Технические характеристики ленточной насадки

Table 2. Technical data of the belt nozzle

Характеристика Characteristic	Значение Value
Параметр h , м/Parameter h , m	0,025
Ширина лент, м/Belt width, m	0,05
Удельная поверхность насадки, m^2/m^3 Nozzle specific surface, m^2/m^3	121
Свободный объем, отн. ед./Free volume, rel. unit	0,96
Эквивалентный диаметр, м/Equivalent diameter, m	0,032

Расчет в соответствии с предложенной методикой выполняется в следующей последовательности.

Изменение температуры жидкости за счет теплового эффекта абсорбции рассчитывается по формуле:

$$\Delta t = \frac{M_{\text{сумм}} Q}{cm_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где Q – тепловой эффект абсорбции, Дж/кмоль; $M_{\text{сумм}}$ – количество компонента, кмоль/ч.

Критерий Рейнольдса в потоке газа определяется по уравнению из работы [6]:

$$Re_{\Gamma} = \frac{wa}{\rho\mu},$$

где a – удельная поверхность насадки, m^2/m^3 ; ρ – плотность газа, kg/m^3 ; μ – вязкость газа, Па·с; w – скорость газа, м/с:

$$D_{\Gamma,i} = D_{\Gamma,0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5},$$

где $D_{\Gamma,0}$ – коэффициент диффузии компонента в газе при н.у., m^2/c .

Критерий Прандтля в газовой фазе:

$$Pr_{\Gamma} = \frac{\mu}{\rho D_{\Gamma}},$$

где D_{Γ} – коэффициент диффузии компонента в газе (m^2/c).

Критерий Нуссельта в газовой фазе:

$$Nu_{\Gamma} = 0,407 Re_{\Gamma}^{0,655} Pr_{\Gamma}^{0,33}.$$

Коэффициент массоотдачи компонента в газовой фазе (м/с):

$$\beta_{\Gamma,i} = \frac{Nu_{\Gamma} D_{\Gamma}}{d_s}.$$

Приведенная толщина пленки жидкости на насадке, м:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}}^2 S}}.$$

Критерий Рейнольдса в жидкой фазе:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{4 m_{\text{H}_2\text{O}}}{Sa\mu_{\text{ж}}\psi},$$

где S – площадь поперечного сечения колонны, m^2 ; ψ – коэффициент смачиваемости поверхности насадки; $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – массовый расход воды в колонне, $kg/ч$.

Критерий Нуссельта в жидкой фазе:

$$Nu_{\text{ж}} = 0,0021 Re_{\text{ж}}^{0,75} Pr_{\text{ж}}^{0,5}.$$

Коэффициент массоотдачи компонента в жидкой фазе:

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{Nu_{\text{ж}} D_{\text{ж}}}{\delta}.$$

Коэффициент массопередачи компонента по газовой фазе ($кмоль/m^2 \cdot c$):

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{\Gamma i}} + \frac{m_{yx}}{\beta_{\text{ж},i}}},$$

где $\beta_{\Gamma,i}$ и $\beta_{\text{ж},i}$ – коэффициенты массоотдачи компонента соответственно в газе и жидкости, м/с; m_{yx} – константа фазового равновесия.

Высота единицы переноса (ВЕП) для газовой фазы рассчитывается по уравнению из работы [6]:

$$h_y = 0,615 d_s Re_{\Gamma}^{0,345} Pr_{\Gamma}^{0,67},$$

где d_s – эквивалентный диаметр насадки, м.

Высота единицы переноса (ВЕП) для жидкой фазы:

$$h_x = 119 \delta Re_{\text{ж}}^{0,25} Pr_{\text{ж}}^{0,5},$$

где δ – приведенная толщина пленки жидкости на насадке, м.

Общая ВЕП рассчитывается по выражению:

$$h_{\text{oy}} = h_y + \frac{m_{yx} V_{\text{H}} / 22,4}{M_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где V_{H} – начальный объемный расход газовой смеси, $nm^3/ч$; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – рабочий мольный расход жидкого поглотителя, кмоль/ч.

Удельный расход жидкого поглотителя:

$$l = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}} / 22,4}. \quad (1)$$

Отношение расхода газа на входе в абсорбер к расходу газа на выходе из абсорбера:

$$g_N = \frac{V_{\text{H}}}{V_{\text{K}}}. \quad (2)$$

Отношение расходов жидкого поглотителя на входе в абсорбер и на выходе из абсорбера [7]:

$$f_1 = \frac{l}{l - \frac{1}{g_N} + 1}$$

Далее определяются средние параметры работы абсорбера.

Средний расход газа в абсорбере:

$$G_{cp} = \frac{V_{гн}}{2 \cdot 3600 \cdot 22,4} \left(1 + \frac{1}{g_N} \right). \quad (3)$$

Средний расход жидкости в абсорбере:

$$M_{cp} = \frac{M_{H_2O}}{2 \cdot 3600} \left(1 + \frac{1}{f_1} \right). \quad (4)$$

Средний абсорбционный фактор равен:

$$A_{cp} = \frac{M_{cp}}{m_{yx} G_{cp}}$$

Определяется параметр B , необходимый для расчета числа единиц переноса:

$$B = 1 - \frac{1}{A_{cp}}. \quad (5)$$

Число единиц переноса (ЧЕП):

$$N = \frac{1}{B} \ln \frac{1 - \gamma / A_{cp}}{1 - \gamma}$$

Суммарная высота слоя насадки определяется по уравнению:

$$H = (N + 1)h_{ов}$$

Следующим этапом является расчет коэффициентов массопередачи.

Относительный коэффициент массопередачи:

$$k_i = \frac{K_{i,y}}{K_{кл,y}}, \quad (6)$$

где $K_{кл,y}$ – коэффициент массопередачи ключевого компонента, кмоль/м²·с.

Объемный коэффициент массопередачи компонента по газовой фазе в слое насадки:

$$K_{г,v} = \frac{I}{\Delta C_{г} HS \frac{\pi d^2}{4}}, \quad (7)$$

где M – количество поглощенного компонента, кмоль/ч.

Коэффициент массопередачи аммиака по газовой фазе, рассчитанный по уравнению (7) для ленточной регулярной насадки, составил 355,1 ч⁻¹. Расчет для керамических колец Рашига (50×50×5) по уравнению (7) дает значение объемного коэффициента массопередачи аммиака по газовой фазе: $K_{г,v}=295,6$ ч⁻¹. Таким образом, объемный коэффициент массопередачи аммиака на кольцах Рашига в 1,2 раза ниже, чем на ленточной регулярной насадке с равным эквивалентным диаметром.

Технические характеристики колец Рашига (50×50×5) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики колец Рашига (50×50×5) [6]

Table 3. Characteristics of Raschig rings (50×50×5) [6]

Характеристика/Characteristic	Значение/Value
Удельная поверхность насадки, м ² /м ³ Nozzle specific surface, m ² /m ³	90
Свободный объем, отн. ед. Free volume, rel. units	0,785
Эквивалентный диаметр, м Equivalent diameter, m	0,035

Представляет интерес сравнить значение объемного коэффициента массопередачи на ленточной насадке с другими известными насадками. В работе [8] приведено эмпирическое уравнение для коэффициента массопередачи при абсорбции аммиака из газовой смеси на хордовой насадке:

$$K_{г} = 0,0109 w^{0,7} l^{0,5}, \quad (8)$$

где $K_{г}$ – коэффициент массопередачи по газовой фазе, кг/(м²·ч·мм рт. ст.); w – скорость газа, м/с; l – количество поглотителя, л/м³ газа. Уравнение (8) получено в результате обобщения большого количества экспериментальных данных.

Уравнение для расчета объемного коэффициента массопередачи (ч⁻¹) на хордовой насадке можно получить, преобразовав уравнение (8):

$$K_{г,T} = 4,81 \cdot 10^{-6} a \psi R_{\mu} T w^{0,7} l^{0,5}. \quad (9)$$

По полученному уравнению (9) выполнен расчет объемного коэффициента массопередачи аммиака на хордовой насадке. При одинаковых условиях работы объемный коэффициент массопередачи на хордовой насадке составил 206,5 ч⁻¹, что в 1,72 раза ниже, чем на регулярной ленточной насадке.

Концентрация аммиака и метиламинов в газовой фазе (в пересчете на диметиламин) на выходе из аппарата определялась по уравнению из [9]:

$$C_{г,\Sigma} = \frac{1000 M r_{DMA} P \sum Y_i}{R_{\mu} T}, \quad (10)$$

где Y_i – конечная концентрация компонента в газовой фазе, отнесенная к начальному количеству газовой смеси, кмоль/кмоль; $M r_{DMA}$ – молекулярная масса диметиламина, кг/кмоль.

Расчеты по уравнению (10) показали, что при замене колец Рашига на ленточную регулярную насадку при одинаковом режиме работы и равной высоте слоя насадки концентрация аммиака и метиламинов в газовой фазе на выходе из абсорбера снижается на 10 %.

Таким образом, применение ленточной насадки позволяет повысить интенсивность процесса абсорбции аммиака и метиламинов водой из газовых смесей и повысить эффективность очистки технологических газов. Более высокую эффективность ленточной насадки можно объяснить образованием развитой поверхности контакта фаз на элементах насадки, обеспеченной оптимальной конструкцией насадки [10, 11].

Большой интерес представляет также разработка математической модели для расчета распределения концентраций компонентов по высоте слоя ленточной регулярной насадки.

В модели принимается допущение, что коэффициенты массопередачи и константы равновесия компонентов газовой смеси не зависят от концентраций других компонентов [8]. Расчет распределения концентраций компонентов в газовой и жидкой фазах по высоте слоя насадки основан на численном решении дифференциальных уравнений математической модели для каждого компонента i .

Концентрации компонентов в газовой и жидкой фазах будем относить к количествам поступающих в абсорбер газа и жидкости (G_1, M_{H_2O}) и обозначим их через Y_i и X_i .

Соотношение между мольными долями и выраженными указанным способом концентрациями компонентов имеет вид:

$$y_{ij} = g_j Y_{ij},$$

$$x_{ij} = f_j X_{ij},$$

где g_j – отношение расхода газовой фазы на входе в абсорбер к расходу газовой фазы на участке j ; f_j – отношение расходов жидкой фазы на входе в абсорбер и на участке j .

Уравнения материального баланса и массопередачи в абсорбере в дифференциальной форме имеют вид [12–15]:

$$G_1 dY_i = -K_i (y_i - y_i^*) dF, \quad (11)$$

$$G_1 dY_i = L_N dX_i, \quad (12)$$

где G_1 – начальный расход газовой смеси, кмоль/ч; L_N – начальный расход абсорбента, кмоль/ч; F – площадь поверхности контакта газа и жидкости, м²; Y_i – концентрация компонента i в газовой фазе, отнесенная к количеству поступающей в абсорбер газовой смеси; X_i – концентрация компонента i в жидкой фазе, отнесенная к количеству поступающего в абсорбер абсорбента; y_i^* – равновесная мольная доля компонента i в газовой фазе; y_i – мольная доля компонента i в газовой фазе; K_i – коэффициент массопередачи по газовой фазе, кмоль/(м²·ч).

Подставив (1) и (6) в дифференциальные уравнения модели (11, 12), и выразив y_i и y_i^* через Y_i и X_i , получим:

$$dY_i = -(gY_i - m_i f X_i) k_i dN.$$

Исключая Y_i , имеем:

$$\frac{d^2 X_i}{dz^2} + S_i \frac{dX_i}{dz} + E_i X_i = 0, \quad (13)$$

где $z=N/N_0$; N_0 – общее число единиц переноса по ключевому компоненту; коэффициенты S_i и E_i имеют значения:

$$S_i = k_i N_0 \left(g - m_i \frac{f}{l} \right) - \frac{1}{g} \frac{dg}{dz},$$

$$E_i = \frac{k_i N_0}{l} \left(m_i \frac{f}{g} \frac{dg}{dz} - \frac{d(m_i f)}{dz} \right).$$

Для уравнения (13) граничные условия имеют вид:

$$Y_i(0) = Y_{i1},$$

$$X_i(1) = X_{iN}.$$

Уравнение (13) решается численным методом с преобразованием его в конечно-разностное уравнение.

Высота насадного слоя разбивалась на 20 конечных участков, каждому из которых присваивался порядковый номер j .

Для ключевого компонента, константа фазового равновесия которого наиболее близка к удельному расходу поглотителя, задаем степень извлечения [8]. В связи с тем, что значение отношения m_{yx}/l для триметиламина ближе к единице, выбирается в качестве ключевого компонента триметиламин (m_{yx} – константа фазового равновесия; l – удельный расход поглотителя).

Предварительные расчеты позволили определить число единиц переноса по триметиламину и удельный расход поглотителя: $N=6, l=20,59$. Коэффициент избытка расхода жидкости (q) принят равным 3. Относительно высокое значение коэффициента избытка жидкости объясняется необходимостью отвода теплоты абсорбции.

Отношение расхода газовой фазы на входе в абсорбер к расходу газовой фазы на выходе из абсорбера рассчитывается по уравнению (2).

Отношение расходов жидкости на входе в абсорбер и на выходе из абсорбера:

$$f_1 = \frac{l}{l - \frac{1}{g_N} + 1}.$$

Средний расход газовой фазы и жидкости в абсорбере рассчитывается по уравнениям (3) и (4) соответственно:

Средний абсорбционный фактор равен:

$$A_{cp} = \frac{M_{cp}}{m_{yx,4} G_{cp}}.$$

Параметр B определяется по выражению (5).

В первом приближении принимается, что g_j линейно меняется по высоте слоя насадки в абсорбере. Далее по значениям g_j рассчитывается f_j для каждого участка слоя насадки:

$$f_j = \frac{l}{l - \frac{1}{g_{j+1}} + \frac{1}{g_j}}.$$

В первом приближении также допускается, что константа фазового равновесия для каждого компонента m_{ij} линейно меняется по высоте слоя насадки в абсорбере.

Относительные коэффициенты массопередачи (по отношению к триметиламину) составили: для аммиака $k_1=1,723$; для монометиламина $k_2=1,754$; для диметиламина $k_3=1,205$; для триметиламина $k_4=1$.

Далее для каждого компонента газовой смеси на каждом участке слоя насадки рассчитываются величины, используемые для определения адсорбционных факторов на участках слоя насадки:

$$r_{ij} = \frac{k_i N}{2nl} (g_j l - m_{ij} f_j) - \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{4g_j},$$

$$p_{ij} = 2 - \frac{k_i N}{2nl} \left(m_{ij} f_j \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{g_j} - m_{i,j+1} f_{j+1} + m_{i,j-1} f_{j-1} \right),$$

$$U_{ij} = \frac{1 - r_{ij}}{p_{ij}},$$

$$V_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{p_{ij}}.$$

Абсорбционный фактор для каждого компонента на первом участке слоя насадки:

$$A_{i1} = \frac{4 - 1/V_{i2}}{3 + (2k_i N/nl)m_{i1}f_1 - U_{i2}/V_{i2}}, \quad (14)$$

и

$$B_{i1} = \frac{(2k_i N/nl)Y_{i1}}{4 - 1/V_{i2}}. \quad (15)$$

Абсорбционный фактор на других участках слоя насадки:

$$A_{ij} = \frac{V_{ij}}{1 - U_{ij}A_{i,j-1}}, \quad (16)$$

$$B_{ij} = \frac{U_{ij}A_{i,j-1}B_{i,j-1}}{V_{ij}}. \quad (17)$$

Последовательность расчета состоит в следующем: в первую очередь рассчитываются A_{i1} и B_{i1} по формулам (14, 15), затем для участков $j=2,3,\dots,n+1$ по формулам (16, 17) определяются A_{ij} и B_{ij} (так называемый прямой ход). Далее определяются значения концентраций X_{ij} для $j=n,n-1,\dots,2,1$ (обратный ход):

$$X_{ij} = A_{ij}(B_{ij} + X_{i,j+1}).$$

По уравнению материального баланса определяются концентрации компонентов в газе на каждом участке:

$$Y_{ij} = Y_{i1} - l(X_{i1} - X_{ij}).$$

Пересчет концентраций в жидкой фазе в другую единицу измерения (кмоль/м³) проводим по формуле:

$$C_{ij} = \frac{x_{ij}\rho_{H_2O}}{Mr_{H_2O}}.$$

Температура жидкой фазы на заданном участке слоя насадки определяется по выражению:

$$t_j = t_1 + \frac{\sum Q_i X_i}{c}.$$

Константа фазового равновесия аммиака m_{pc} (м³·Па/кмоль) на заданном участке определяется по уравнению из работы [8]:

$$\lg \frac{m_{pc,1j}}{98100} = 4,125 + 0,1 \cdot \lg C_{1j} - \frac{1750}{T_j}.$$

Уточненная константа фазового равновесия аммиака $m'_{yx,1j}$ составит:

$$m'_{yx,1j} = m_{pc,1j} \frac{\rho}{PMr_{H_2O}}.$$

Во втором приближении отношение расходов g'_i определяется по значениям Y_{ij} , найденным в первом приближении:

$$g'_j = \frac{1}{1 - \sum (Y_{i1} - Y_{ij})}.$$

Далее во втором приближении определяется f'_i по уравнению:

$$f'_j = \frac{l}{l - \frac{1}{g_{j+1}} + \frac{1}{g_j}}.$$

Полученные таким образом g'_j и f'_j используются для второго расчетного цикла (второго приближения).

По данной методике расчет выполнен для следующих условий: расход газа при нормальных условиях 500 м³/ч; диаметр колонны 2,8 м. Состав газа на входе в абсорбер приведен в табл. 1. Расчеты выполнены для регулярной ленточной насадки ($d_s=0,032$ м) [2] и для колец Рашига «внавал» ($50 \times 50 \times 5$, $d_s=0,035$ м).

Полученное в результате расчетов распределение концентрации аммиака в газовой фазе по высоте слоя ленточной регулярной насадки и колец Рашига представлено на рис. 3. Как видно из рис. 3, скорость снижения концентрации аммиака в газовой фазе на ленточной регулярной насадке выше скорости снижения концентрации аммиака в газовой фазе на кольцах Рашига. Это свидетельствует об ускорении процесса массопередачи при использовании ленточной регулярной насадки вместо кольцевой.

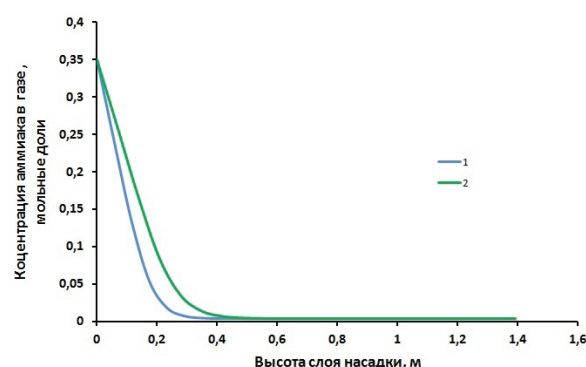


Рис. 3. Распределение концентрации аммиака в газовой фазе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

Fig. 3. Distribution of ammonia concentration in gas phase over the belt nozzle bed height (1) and Rachig rings (2)

Интенсификацию процесса абсорбции можно количественно оценить на основании отношения изменения концентраций аммиака на одинаковом участке ленточной насадки и колец Рашига:

$$\frac{\Delta y_{\text{лент.},j}}{\Delta y_{\text{Раш.},j}} = 1,18. \quad (18)$$

Для вычислений по уравнению (18) принято изменение концентраций на начальном (нижнем) участке высотой 0,2 м, на котором происходит существенное изменение концентраций (рис. 3).

Таким образом, по распределению концентрации аммиака (рис. 3) можно установить, что ленточная насадка обеспечивает интенсификацию процесса массопередачи в сравнении с кольцами Рашига в 1,18 раза, т. е. на 18 %.

На кривой распределения концентрации триметиламина в газовой фазе можно отметить наличие начального горизонтального короткого участка (рис. 4). Его наличие объясняется тем, что интенсивное поглощение аммиака на нижнем участке насадки приводит к существенному снижению общего объема газовой фазы. Вследствие этого имеет место некоторая задержка снижения концентрации триметиламина.

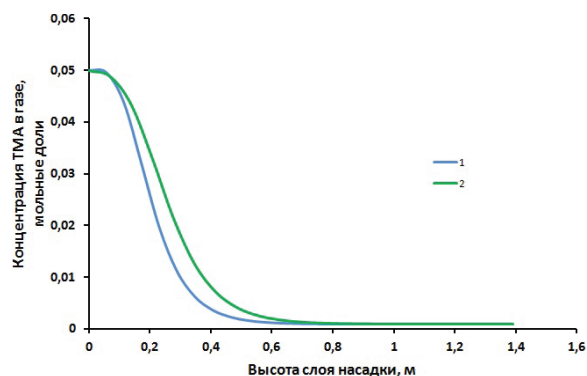


Рис. 4. Распределение концентрации триметиламина в газовой фазе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2)

Fig. 4. Distribution of trimethylamine concentration in gas phase over the belt nozzle bed height (1) and Rachig rings (2)

В представленных расчетах коэффициент избытка расхода абсорбента составлял $q=3$. При снижении коэффициента избытка с 3 до 2 характер кривой изменения концентрации триметиламина в газе меняется: на начальном участке кривой появляется экстремум (рис. 5). Это можно объяснить относительным снижением скорости абсорбции триметиламина из-за снижения расхода воды и повышения ее температуры. При этом существенное снижение расхода газовой фазы на нижнем участке насадки при некотором снижении скорости абсорбции триметиламина приводит к росту концентрации триметиламина в газе. Этот эффект нежелателен, поскольку может привести к локальному проскоку газообразного триметиламина через слой насадки и снизить общую эффективность абсорбции.

Исходя из анализа изменений концентрации ТМА в газе (рис. 4, 5) можно рекомендовать использовать при абсорбции аммиака и метиламинов коэффициент избытка расхода абсорбента $q \geq 3$. Предложенный подход к моделированию массообмена можно рекомендовать и для моделирования других новых регулярных насадок [16–18].

Достоверность предложенной математической модели подтверждается согласованностью результатов расчета интенсификации процесса массопередачи на ленточной насадке двумя методами. Во-первых, методом расчета интенсификации по отношению изменения концентраций в слоях насадки (18). Изменение концентраций при этом было получено путем численного решения дифференциальных уравнений модели (11), (12). Во-вторых, методом расчета интенсификации по отношению объемных коэффициентов массопередачи в слое ленточной насадки и в слое колец Рашига, которые были рассчитаны по уравнению (7).

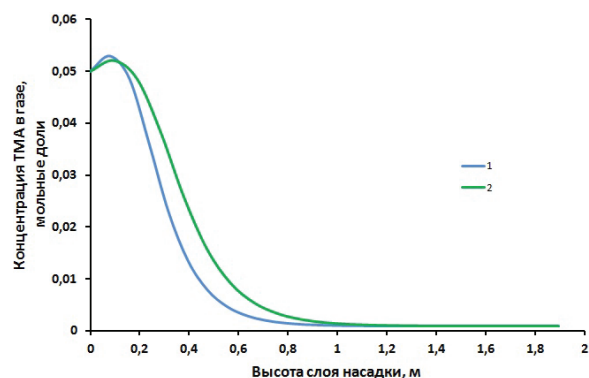


Рис. 5. Распределение концентрации триметиламина в газовой фазе по высоте слоя ленточной насадки (1) и колец Рашига (2) при $q=2$

Fig. 5. Distribution of trimethylamine concentration in gas phase over the belt nozzle bed height (1) and Rachig rings (2) at $q=2$

Первый метод дал значение интенсификации процесса массопередачи в 1,18 раза, а второй — в 1,2 раза, что говорит о согласованности и надежности двух методов, а также об адекватности математической модели (11), (12), положенной в основу расчета распределения концентраций.

Достоверность математической модели (11), (12) подтверждается также надежностью фундаментальных уравнений массопередачи, положенных в основу модели, и обоснованностью принятых допущений, а также результатами исследований многокомпонентной абсорбции других авторов [8], в которых показана возможность возникновения экстремумов на кривой распределения компонентов в слое насадки.

Выводы

1. Методика расчета промышленного абсорбера с регулярной ленточной насадкой, разработанная на основе учета влияния конструктивных особенностей ленточной насадки на интенсив-

- ность абсорбции, позволяет определить основные параметры слоя насадки (высоту, диаметр), а также объемный коэффициент массопередачи. Установлено, что объемный коэффициент массопередачи на ленточной регулярной насадке в 1,2 раза превышает объемный коэффициент массопередачи на кольцах Рашига, и в 1,72 раза выше, чем на хордовой насадке.
2. Математическая модель процесса абсорбции, предложенная на основе учета многокомпонентности газовой смеси, является адекватной и позволяет определить характер распределения концентрации компонентов по высоте слоя насадки, который зависит от коэффициента избытка расхода жидкости.
 3. При коэффициенте избытка $q=2$ на кривой распределения концентрации триметиламина возникает экстремум, объясняющийся относительным снижением скорости абсорбции триметиламина водой в результате снижения расхода воды и увеличения ее температуры. Это позволяет рекомендовать в промышленных абсорберах работать в режиме с коэффициентом избытка расхода воды не менее 3 ($q \geq 3$).
 4. Регулярную ленточную насадку можно рекомендовать к применению не только для проведения процесса абсорбции, но и других процессов химической технологии, например процессов десорбции, ректификации и флотации [19, 20].
- ### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
1. Определение гидравлического сопротивления ленточной насадки / И.В. Скачков, А.В. Бальчугов, И.Е. Кузора, В.В. Коробочкин // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 11. – С. 45–50.
 2. Полинова Е.В., Вальдберг А.Ю. Расчет основных характеристик массообменного процесса в абсорберах с волоконистой насадкой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 2. – С. 12–15.
 3. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов классификации в них процессов тепломассообмена / А.С. Пушнов, И.О. Микуленок, А.С. Севрюков, М.Г. Беренгартен // Химическая технология. – 2014. – № 4. – С. 244–250.
 4. Plate Efficiency in Rectification of Binary Mixtures in the Presence of an Inert Gas / I.A. Semenov, B.A. Ulyanov, D.N. Sitnikov, M.Yu. Fereferov // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2011. – V. 84. – № 12. – P. 2071–2075.
 5. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of Ultrasound on the Dissolution of Carbon Dioxide in Water // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2011. – V. 45. – № 1. – P. 21–25.
 6. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Альянс, 2007. – 576 с.
 7. Архаров И.А., Навасардян Е.С. Моделирование процессов тепломассообмена на регулярных насадках колонн дистилляционных установок // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 9. – С. 22–25.
 8. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: РГБ, 2009. – 655 с.
 9. Фереферов М.Ю., Зуева Е.О. Определение содержания сероводорода в аммиачном газе // Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 135–138.
 10. Скачков И.В., Бальчугов А.В., Рыжов С.О. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3 (35). – С. 147–150.
 11. Гидродинамические исследования двух модификаций регулярной насадки / И.В. Скачков, А.В. Бальчугов, М.В. Андреевко, С.М. Султанов // Современные технологии и научно-технический прогресс: Межвузовская научн. конф.: Тез. докл. – 2014. – С. 27.
 12. Ulyanov B.A., Semenov I.A., Kulov N.N. Efficiency of Mass Transfer Trays with Allowance Made for Nonequimolar Counterdiffusion // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2011. – V. 45. – № 5. – P. 575–580.
 13. Simulation of a Distillation Column with Nonequimolar Mass Transfer in the Production of Methylamines / I.A. Semenov, B.A. Ulyanov, D.A. Dubrovskii, N.N. Kulov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – V. 48. – № 5. – P. 644–649.
 14. Динамика газовых пузырьков в жидкостях / Е.В. Подоппелов, Д.П. Свиридов, И.А. Семёнов, Б.А. Ульянов // Вестник Ангарской государственной технической академии. – 2008. – № 1. – С. 10–14.
 15. Коэффициенты массоотдачи в жидкости при растворении пузырьков углекислоты в условиях акустических воздействий / Е.В. Подоппелов, И.А. Семёнов, В.В. Бизимов, А.И. Лущев // Современные технологии и научно-технический прогресс: Межвузовская научн. конф.: Тез. докл. – 2009. – С. 27.
 16. Исследование гидродинамики регулярных насадок из сетчатых наклонных цилиндров для осуществления тепло- и массообменных процессов / М.В. Шилин, М.Г. Беренгартен, А.С. Пушнов, М.И. Ключенкова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 10–13.
 17. Дмитриев А.В., Дмитриева К.В., Николаев А.Н. Распределение жидкой фазы в колонных массообменных аппаратах с регулярной насадкой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 2. – С. 3–5.
 18. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена / А.С. Пушнов, И.О. Микуленок, А.С. Севрюков, М.Г. Беренгартен // Химическая технология. – 2014. – № 4. – С. 244–250.
 19. Математическое описание динамики реактентного режима флотации / А.В. Бадеников, В.Я. Бадеников, Н.С. Благодарный, М.В. Кривов // Вестник Ангарской государственной технической академии. – 2014. – № 8. – С. 6–7.
 20. Бадеников А.В. Реальный окислительно-восстановительный потенциал флотации // Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии. – 2013. – № 1. – С. 102–104.

Поступила 31.03.2015 г.

UDC 66.021

MODELING OF AMMONIA AND METHYLAMINE ABSORPTION WITH WATER ON A NEW REGULAR PACKING

Matvey V. Andreenko,

Angarsk State Technical Academy, 60, Tchaykovskogo street, Angarsk, 665835,
Russia. E-mail: balchug@mail.ru

Iliya V. Skachkov,

Angarsk State Technical Academy, 60, Tchaykovskogo street, Angarsk, 665835,
Russia. E-mail: Iliya_8_7@mail.ru

Alexey V. Balchugov,

Angarsk State Technical Academy, 60, Tchaykovskogo street, Angarsk,
665835, Russia. E-mail: balchug@mail.ru

Valeriy V. Korobochkin,

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

Relevance of the work is caused by the lack of mathematical description of ammonia and methylamines absorption from multicomponent gas mixtures in a regular packing.

The main aim in the study is to develop a mathematical model and the method of calculating ammonia and methylamines absorption from a gas mixture in a new regular tape packing. The nozzle can increase the degree of purification of process gases and intensify the absorption.

The methods used in the study. Differential equations of mathematical model, incorporating material balance equation and mass transfer equations, are solved numerically.

The results. The authors have calculated the volumetric mass transfer coefficient in a regular belt layer and the nozzle layer of Raschig rings at ammonia absorption from a gas mixture. The distribution of concentrations of the components over the packed bed height was determined and the comparative analysis of the mass transfer efficiency of a mixture of ammonia and amines absorption on regular and circular nozzles was carried out. It is shown that the volumetric coefficient of ammonia mass transfer on Raschig rings is in 1,2 times lower than that in a regular nozzle tape with an equal equivalent diameter and the mass transfer coefficient for a nozzle of the chord is in 1,72 times lower than that on a regular nozzle tape. When replacing the Raschig rings by a regular nozzle tape with the same mode of operation of the column and equal packed bed height the methylamines and ammonia concentration in gas phase at the outlet of the absorber is reduced by 10 %. At reducing fluid flow rate excess from 3 to 2 in the curve of change in trimethylamine concentration in gas by the packed bed height the layer extremum occurs. This can be explained by the relative decrease in trimethylamine absorption rate due to reduction of water consumption and increase in its temperature.

Key words:

Absorption, packing, mass transfer, modeling, ammonia, methylamine.

REFERENCES

- Skachkov I.V., Balchugov A.V., Kuzora I.E., Korobochkin V.V. Opredelenie gidravlicheskogo soprotivleniya lentochnoy nasadki [Determination of the tape packing hydraulic resistance]. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*, 2013, no. 11, pp. 45–50.
- Polienova E.V., Valdberg A.Yu. Raschet osnovnykh kharakteristik massoobmennogo protsessa v absorberakh s voloknistoy nasadkoy [The calculation of the basic characteristics of mass transfer processes in absorbers with fiber packing]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2011, no. 2, pp. 12–15.
- Pushnov A.S., Mikulenok I.O., Sevryukov A.S., Berengarten M.G. Klassifikatsiya konstruktsiy nasadok kolonnykh apparatov i metodov klassifikatsii v nikh protsessov teplomassoobmena [Classification of designs nozzles column apparatuses and methods for classification heat and mass transfer processes in them]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, no. 4, pp. 244–250.
- Semenov I.A., Ulyanov B.A., Sitnikov D.N., Fereferov M.Yu. Plate Efficiency in Rectification of Binary Mixtures in the Presence of an Inert Gas. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2011, vol. 84, no. 12, pp. 2071–2075.
- Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of ultrasound on the dissolution of carbon dioxide in water. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2011, vol. 45, no. 1, pp. 21–25.
- Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and problems at the rate of processes and devices of chemical technology]. Moscow, Alyans, 2007. 576 p.
- Arkharov I.A., Navasardyan E.S. Modelirovanie protsessov teplomassoobmena na regulyarnykh nasadkakh kolonn distillyatsionnykh ustanovok [Modelling of heat and mass transfer processes on regular column packing distillation units]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2006, no. 9, pp. 22–25.
- Fereferov M.Yu., Zueva E.O. Opredelenie soderzhaniya serovodroda v ammiachnom gaze [Determination of hydrogen sulfide in ammonia gas]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskoy gosudarstvennoy tekhnicheskoy akademii*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 135–138.
- Skachkov I.V., Balchugov A.V., Ryzhov S.O. Hidrodinamicheskie issledovaniya tekhnologii gazozhidkostnykh protsessov na novoy regulyarnoy nasadke [Hydrodynamic studies of gas-liquid technology processes in a new regular packing]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie*, 2012, no. 3 (35), pp. 147–150.
- Skachkov I.V., Balchugov A.V., Andreenko M.V., Sultanov S.M. Hidrodinamicheskie issledovaniya dvukh modifikatsy regulyarnykh

- noy nasadki [Hydrodynamic studies of two modifications of regular packing]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress: Mezhevuzovskaya nauchn. konf.: Tez. dokl.* [Modern technologies and scientific progress. Proc. International scientific conference], 2014, p. 27.
11. Ramm V.M. *Absorbtsiya gazov* [Absorption gas]. Moscow, RGB Publ., 2009. 655 p.
 12. Ulyanov B.A., Semenov I.A., Kulov N.N. Efficiency of Mass Transfer Trays with Allowance Made for Nonequimolar Counter-diffusion. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2011, vol. 45, no. 5, pp. 575–580.
 13. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Dubrovskii D.A., Kulov N.N. Simulation of a Distillation Column with Nonequimolar Mass Transfer in the Production of Methylamines. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 644–649.
 14. Podoplelov E.V., Sviridov D.P., Semenov I.A., Ulyanov B.A. Dinamika gazovykh puzyrkov v zhidkostyakh [The dynamics of gas bubbles in liquids]. *Vestnik Angarskoy gosudarstvennoy tekhnicheskoy akademii*, 2008, no. 1, pp. 10–14.
 15. Podoplelov E.V., Semenov I.A., Bizimov V.V., Lushev A.I. Koeffitsienty massootdachi v zhidkosti pri rastvorenii puzyrkov uglekisloty v usloviyakh akusticheskikh vozdeystviy [The coefficients of mass transfer in a liquid by dissolving bubbles of carbon dioxide in the conditions of acoustic effects]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress: Mezhevuzovskaya nauchn. konf.: Tez. dokl.* [Modern technologies and scientific progress. Proc. International scientific conference], 2009, p. 27.
 16. Shilin M.V., Berengarten M.G., Pushnov A.S., Klyushenkova M.I. Issledovanie gidrodinamiki regulyarnykh nasadok iz setchatykh naklonnykh tsilindrov dlya osushchestvleniya teplo- i massoobmennykh protsessov [A study of the hydrodynamics of regular nozzles inclined mesh cylinders for heat and mass transfer processes]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2012, no. 10, pp. 10–13.
 17. Dmitriev A.V., Dmitrieva K.V., Nikolaev A.N. Raspreделение zhidkoy fazy v kolonnykh massoobmennykh apparatakh s regulyarnoy nasadkoy [The distribution of the liquid phase of column mass transfer devices with a regular nozzle]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2011, no. 2, pp. 3–5.
 18. Pushnov A.S., Mikulenok I.O., Sevryukov A.S., Berengarten M.G. Klassifikatsiya konstruksiy nasadok kolonnykh apparatov i metodov intensivatsii v nikh protsessov teplomassoobmena [Classification of designs of column apparatus nozzles and the methods for intensifying heat and mass transfer processes in them]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, no. 4, pp. 244–250.
 19. Badenikov A.V., Badenikov V.Ya., Blagodarny N.S., Krivov M.V. Matematicheskoe opisanie dinamiki reagentnogo rezhima flotatsii [The mathematical description of the dynamics of the flotation reagent regime]. *Vestnik Angarskoy gosudarstvennoy tekhnicheskoy akademii*, 2014, no. 8, pp. 6–7.
 20. Badenikov A.V. Realny oksiditelno-vosstanovitelny potentsial flotatsii [Real redox potential flotation] *Sbornik nauchnykh trudov Angarskoy gosudarstvennoy tekhnicheskoy akademii*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 102–104.

Received: 31 March 2015.

УДК 532.528:532.574.7:532.582.32

ОСОБЕННОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ УМЕНЬШЕННОЙ МОДЕЛИ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛОПАТОК РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

Тимошевский Михаил Викторович,

инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1; ст. лаборант Новосибирского
национального исследовательского государственного университета, Россия,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2. E-mail: timoshevskiy.mv@gmail.com

Чуркин Сергей Андреевич,

инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1; лаборант-исследователь
Новосибирского национального исследовательского государственного
университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.
E-mail: c.a.churkin@gmail.com

Кравцова Александра Юрьевна,

мл. науч. сотр. Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. ак. Лаврентьева, 1; мл. науч. сотр. Новосибирского национального
исследовательского государственного университета, Россия, 630090,
г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2. E-mail: Kravtsova.Alya@gmail.com

Первунин Константин Сергеевич,

мл. науч. сотр. Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. ак. Лаврентьева, 1; мл. науч. сотр. Новосибирского национального
исследовательского государственного университета, Россия, 630090,
г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2. E-mail: pervunin@itp.nsc.ru

Семёнов Георгий Александрович,

канд. физ.-мат. наук, ведущ. конструктор СКБ «Гидротурбомаш»,
ОАО «Силовые машины», Россия, 195009, г. Санкт-Петербург,
ул. Ватутина, 3А. E-mail: Semenov_GA@lmz.power-m.ru

Маркович Дмитрий Маркович,

д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, зам. директора Института теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1; профессор
Новосибирского национального исследовательского государственного
университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2; профессор
Национального исследовательского Томского политехнического
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: dmark@itp.nsc.ru

Ханъялич Кемал,

профессор Новосибирского национального исследовательского
государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск,
ул. Пирогова, 2; профессор Факультета химического машиностроения
Делфтского технического университета, Нидерланды, 2628 BL,
Delft, Julianalaan, 136. E-mail: khanjalic@gmail.com

Общепризнанно, что основными причинами ухудшения эксплуатационных характеристик гидротехнического оборудования являются процессы кавитации и нестационарности различной природы.

Цель работы: изучение кавитационных режимов и нестационарностей парогазовых каверн, возникающих на стороне разрежения двух симметричных тел обтекания: гидрокрыла NACA0015 и уменьшенной модели направляющих лопаток высоконапорных турбин.

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

Результаты. Для малых углов атаки ($\alpha=3^\circ$) при пузырьковой кавитации максимальный размер пузырей достигает 12 мм на модели направляющих лопаток и 13 мм на гидрокрыле NACA0015 непосредственно перед их схлопыванием. Эта разница, вероятно, вызвана различием в распределениях давления на стороне разрежения гидропрофилей. При уменьшении числа кавитации размер пузырей сокращается. Средняя скорость переноса пузырей несколько выше на модели направляющих лопаток при одинаковых числах кавитации. Увеличение угла атаки до $\alpha=9^\circ$ приводит к изменению структуры присоединенной каверны на модели направляющих лопаток с пузырьковой на стриковую, как и в случае гидрокрыла NACA0015. При уменьшении числа кавитации наблюдается облачная кавитация, вызванная развитием собственной неустойчивости – возвратного течения под каверной вследствие действия неблагоприятного градиента давления. На модели направляющих лопаток переход к нестационарному режиму обтекания происходит быстрее (при меньшем изменении числа кавитации). Для модели направляющих лопаток был обнаружен новый вид облачной неустойчивости, который также характеризуется периодическим отрывом присоединенной каверны и последующим формированием облачной каверны. Основной особенностью этого типа облачной неустойчивости является то, что процесс отрыва кавитационных облаков сначала случается в пределах одной половины каверны от центрального сечения рабочего канала к одной из его боковых стенок, а затем происходит на другой стороне. Впоследствии этот цикл полностью повторяется. Данный процесс происходит на удвоенной частоте традиционной облачной кавитации и поэтому рассматривается в настоящей работе как высшая субгармоника облачной неустойчивости.

В случае однофазного потока при $\alpha=9^\circ$ поперечный размер турбулентного следа за моделью направляющих лопаток примерно в два раза больше, чем за гидрокрылом NACA0015. Это вызвано отрывом потока от поверхности лопатки приблизительно на расстоянии 71 % длины хорды от передней кромки. Кроме того, по сравнению с малыми углами атаки отрыв потока на лопатке приводит к росту турбулентных флуктуаций в следе и появлению второго максимума в распределениях флуктуационной составляющей скорости.

Ключевые слова:

Кавитация, присоединенные/облачные каверны, системные/собственные неустойчивости, направляющая лопатка, гидрокрыло NACA0015, высокоскоростная визуализация, анемометрия по изображениям частиц.

Введение

Известно, что нестационарные кавитационные явления в гидроэнергетических системах являются одним из основных источников неустойчивостей и механических повреждений. В особенности кавитации подвержены лопатки направляющего аппарата, лопасти рабочего колеса и отсасывающие трубы гидротурбин. Если не принимать во внимание вездесущую эрозию, кавитация не считается опасной до тех пор, пока не происходит переход к неустойчивым режимам. При этом кавитация является причиной разного рода нестационарностей, пульсаций и других форм локальных и глобальных неустойчивостей, что в результате нарушает работу всей системы в целом и влечет за собой дополнительные потери при преобразовании энергии. Нестационарность течения неизбежно приводит к нарушению прочности конструкций, дисбалансу нагрузок, шуму и вибрациям на элементах оборудования, их усталостным и, в конечном счете, необратимым разрушениям. Последствиями этого могут быть постоянные повреждения гидроагрегатов или в худших случаях даже аварийные ситуации. В течение длительного времени способы полного или, по крайней мере, частичного подавления и управления кавитацией и других причин появления нестационарностей в реальных гидроэнергетических системах находятся в фокусе внимания и являются главной проблемой конструкторов и операторов.

Несмотря на достаточно глубокое понимание физики и механизмов протекающих процессов, развитие средств и методов для подавления и управления кавитацией, а также наличие утвержденных рекомендаций и протоколов для безаварийной эксплуатации и технического обслуживания, до сих пор существует целый ряд проблем, отличающихся для разных ГЭС и зависящих от типа используемого машинного оборудования, их размеров, режимов и графиков эксплуатации. Одной из таких проблем, которая послужила мотивом для данной работы, является отсутствие открытых данных систематических исследований для производственного оборудования. Общедоступные результаты исследований в большинстве случаев получены в лабораторных условиях или путем компьютерных вычислений на телах стандартной формы, которые, как правило, отличаются тем или иным образом от специальных профилей, применяющихся в реальных системах. Таким образом, часто возникают следующие и подобные им вопросы: насколько кавитационные режимы обтекания направляющих лопаток и лопастей рабочего колеса соответствуют режимам для модельных тел обтекания (например, гидрокрыльев серии NACA), какой тип неустойчивостей определяет динамику каверн, каковы особенности турбулентной структуры течения вблизи лопаток и лопастей в сравнении со стандартными гидропрофилями?

Несмотря на относительно большой набор общих свойств, кавитационные течения вблизи тел близкой формы и одинаковых размеров могут иметь ряд отличительных особенностей. Изучение этих особенностей необходимо в случаях, когда объектом исследования является гидрокрыло, профилированное для воспроизведения формы двумерной лопатки или трехмерной лопасти (даже для уменьшенных моделей), используемых в реальных гидротехнических системах. Пространственная структура и динамика кавитационных каверн на типовых симметричных телах описана во многих экспериментальных и численных исследованиях (например, [1–10]), распределения средних и турбулентных характеристик вблизи них также представлены в ряде работ (например, [11–16]). Однако результаты исследований для направляющих лопаток и/или лопастей рабочего колеса в литературе до сих пор недоступны.

Основным требованием к лопаткам в направляющих аппаратах гидроагрегатов является недопустимость отрывов потока от их поверхности, а турбулентный след за ними должен быть как можно слабее при различных режимах эксплуатации. В высоконапорных турбинах используются две стандартных формы направляющих лопаток: симметричная и асимметричная. Если угол охвата спиральной камеры турбины менее 270° , предпочтительно использовать наиболее простые лопатки с симметричным профилем. Направляющие лопатки с асимметричным профилем устанавливаются в турбины, для которых угол охвата спиральной камеры составляет около 360° .

В настоящей статье исследуется обтекание уменьшенной модели симметричной направляющей лопатки радиально-осевой турбины. В работе приводится анализ данных высокоскоростной визуализации по пространственной структуре и динамике кавитационных каверн и рассчитанных на их основе интегральных характеристик, а также результатов измерений пространственных распределений средней скорости и турбулентных характеристик течений вблизи лопатки, в сравнении с данными для хорошо изученного гидрокрыла NACA0015 того же размера.

Условия эксперимента и методика измерений

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. Описание стенда, условий эксперимента и используемых методов измерений можно найти в [16]. Тела обтекания (рис. 1) – гидрокрыло NACA0015 и уменьшенная модель направляющей

лопатки (НЛ) – помещались в рабочий канал установки. Для достижения различных кавитационных режимов на обоих телах обтекания в экспериментах путем изменения среднерасходной скорости течения варьировалось число кавитации $\sigma = (P_{in} - P_v) / (\rho U_0^2 / 2)$, где P_{in} – статическое давление на входе в рабочий канал; P_v – давление насыщенных паров рабочей жидкости; ρ – плотность рабочей жидкости; U_0 – среднерасходная скорость потока. Исследования проводились для трех углов атаки $\alpha = 0, 3$ и 9° . Оба тела обтекания были изготовлены из латуни со средним уровнем шероховатости поверхности около 1,5 мкм. Длина хорды обоих гидрокрыльев составляла $C = 100$ мм. Максимальная толщина НЛ достигает $H_{max} = 0,2149 C$ на расстоянии $x_{max} = 0,4283 C$ от передней кромки. Профиль НЛ был получен путем аппроксимации точек, представленных в табл. 1, сплайном.

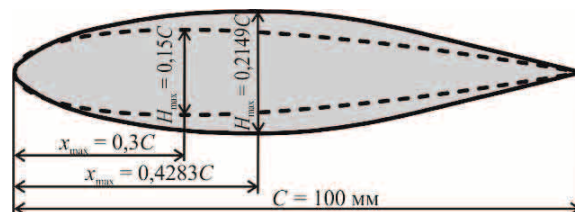


Рис. 1. Схемы тел обтекания: гидрокрыла NACA0015 (пунктирная линия) и уменьшенной модели НЛ (сплошная линия). Максимальные толщины составляют 15 и 21,49 мм на расстоянии 30 и 42,83 мм от передней кромки для соответственно гидрокрыла NACA0015 и модели НЛ с длиной хорды 100 мм. Радиус округления носовой части составляет 2,48 мм для гидрокрыла NACA0015 и 1,97 мм – для НЛ

Fig. 1. Diagrams of the test foils: a NACA0015 hydrofoil (dashed line) and scaled-down model of a guide vane (GV) (solid line). Maximum thicknesses are 15 and 21,49 mm at distances of 30 and 42,83 mm from the leading edge for NACA0015 hydrofoil and GV model with the chord length of 100 mm, respectively. The rounding radius of the leading edge is 2,48 mm for the NACA0015 hydrofoil and 1,97 mm for the GV model

Результаты

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований кавитирующих течений на модели НЛ и гидрокрыле NACA0015 для углов атаки $\alpha = 3$ и 9° при различных числах кавитации. Сначала рассматриваются особенности режимов обтекания, зарегистрированные путем высокоскоростной визуализации, и проводится анализ вычисленных по визуальным данным интегральных характеристик. Далее приводится сравнение распределений средних скоростей и турбулентных харак-

Таблица. Толщина модели НЛ в зависимости от положения вдоль хорды. Профиль НЛ получен путем аппроксимации сплайном этих значений

Table. Thickness of the GV model depending on the position along the chord. The GV profile was obtained by spline approximation of these values

x/C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
H/C	0	0,13	0,1769	0,2051	0,2144	0,2102	0,1864	0,1461	0,098	0,0495	0

теристик (на примере флуктуационной составляющей продольной компоненты скорости) вблизи поверхности обоих гидропрофилей.

Визуализация кавитационных режимов

Малый угол атаки

При $\alpha=3^\circ$ кавитация зарождается на расстоянии 3 мм за передней кромкой со стороны разрежения обоих гидрокрыльев в форме перемещающихся пузырей (рис. 2, а.1, б.1). В данной работе предполагается, что эти перемещающиеся пузыри имеют полусферическую форму, как наблюдалось в ряде предыдущих работ (например, [17, 18]). Максимальный размер пузырей D_{\max} составляет примерно 5 мм на модели НЛ при $\sigma=1,16$ (рис. 2, а.1) и 7 мм на гидрокрыле NASA0015 при $\sigma=1,09$ (рис. 2, б.1). Уменьшение числа кавитации приводит к увеличению размера пузырей до критического (максимального) значения – 12 мм для НЛ при $\sigma=0,95$ и 13 мм для гидрокрыла NASA при $\sigma=0,89$ (рис. 3, а). Как установлено в [18], размер перемещающихся пузырей зависит фактически от расстояния от передней кромки гидрокрыла и минимального значения локального коэффициента давления Cr_{\min} , которое напрямую связано с формой гидрокрыла. Поэтому значение Cr_{\min} для модели НЛ, судя по всему, выше (в настоящей работе распределение локального давления на поверхности гидрокрыльев не измерялось, поэтому это лишь предположение), и, следовательно, локальное давление вдоль поверхности НЛ распределено более гладко по сравнению с гидропрофилем NASA0015. Это и является причиной меньшего размера перемещающихся пузырей на модели НЛ по сравнению с гидрокрылом NASA0015. Как видно на рис. 3, а, закон роста пузырей от числа кавитации является линейным для обоих гидрокрыльев, а измеренные значения лежат на одной линии. Однако дальнейшее уменьшение числа кавитации (когда происходит переход к нестационарным режимам обтекания) приводит к резкому уменьшению размеров пузырей на обоих телах обтекания.

Средняя конвективная скорость перемещающихся пузырей (в данном анализе учитывались только пузыри, движущиеся вдоль центральной линии гидрокрыла, как наиболее релевантные) U_B , которая оценивалась на основе визуальных данных как репрезентативное расстояние, преодолеваемое пузырями в течение своего времени жизни, составляет 18,05 м/с для модели НЛ при средней скорости течения $U_0=12,09$ м/с ($\sigma=1,16$, рис. 2, а.1) и 17,08 м/с для гидрокрыла NASA0015 при $U_0=12,28$ м/с ($\sigma=1,09$, рис. 2, б.1). Таким образом, конвективная скорость пузырей на модели НЛ больше при меньшем значении среднерасходной скорости в сравнении с гидрокрылом NASA0015. Это связано с тем, что профиль НЛ имеет больший поперечный размер (рис. 1), и, следовательно, локальная скорость течения над его поверхностью выше. Как можно видеть на рис. 3, б, нормированные значения конвективной скорости пузырей достигают своего

максимума $1,51U_0$ для НЛ и $1,39U_0$ для NASA0015 при $\sigma \approx 1,1$. Однако при числах кавитации, меньших этого критического значения, U_B , по всей видимости, практически перестает зависеть от числа кавитации (лишь немного падает с уменьшением σ) и приблизительно на 40 % больше U_0 . Более того, из [18] известно, что разница локальных скоростей жидкости и пузырьков, как правило, не превышает 10 %, и поэтому в данной работе оценка скорости скольжения фаз не проводилась. Когда пузыри попадают в область повышенного давления (где локальное давление становится больше давления насыщенных паров жидкости), расположенную ниже по течению, они схлопываются. Это происходит ориентировочно при достижении пузырями сечения, в котором гидрокрыло имеет максимальную толщину (рис. 1): $x/C \approx 0,43$ для НЛ и 0,3 для NASA0015.

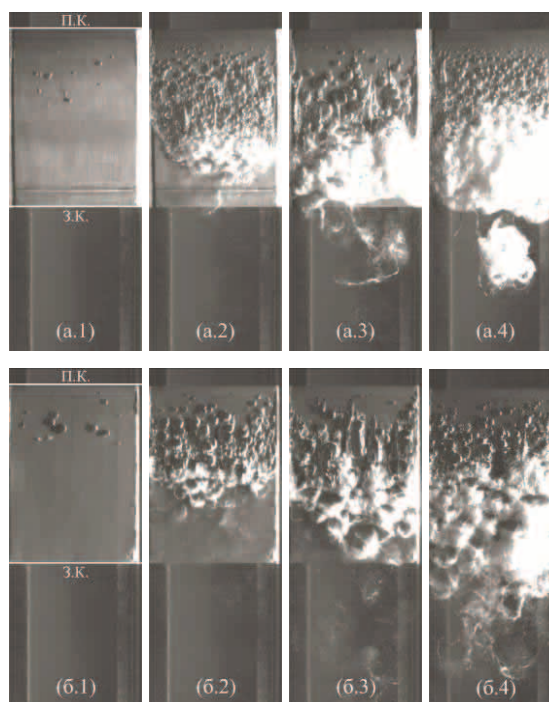


Рис. 2. Мгновенные изображения кавитационных каверн (вид сверху) со стороны разрежения (а) направляющей лопатки при (а.1) $\sigma=1,16$ (пузырьковая кавитация), (а.2) $\sigma=1,11$, $L_c/C=0,53$ (переходный режим), (а.3) $\sigma=0,99$, $L_c/C=0,87$, $St=0,08$ (нестационарный режим), (а.4) $\sigma=0,9$, $L_c/C=1,07$, $St=0,12$ (нестационарный режим) и (б) гидрокрыла NASA0015 при (б.1) $\sigma=1,09$ (пузырьковая кавитация), (б.2) $\sigma=1$, $L_c/C=0,54$ (переходный режим), (б.3) $\sigma=0,89$, $L_c/C=0,66$ (переходный режим), (б.4) $\sigma=0,82$, $L_c/C=1,06$, $St=0,07$ (нестационарный режим). $\alpha=3^\circ$. Направление потока – сверху вниз

Fig. 2. Instant images of partial cavities (top view) on the suction side of (a) the guide vane at (a.1) $\sigma=1,16$ (traveling bubbles), (a.2) $\sigma=1,11$, $L_c/C=0,53$ (transitional regime), (a.3) $\sigma=0,99$, $L_c/C=0,87$, $St=0,08$ (unsteady cavity), (a.4) $\sigma=0,9$, $L_c/C=1,07$, $St=0,12$ (unsteady cavity) and (b) the NACA0015 hydrofoil at (б.1) $\sigma=1,09$ (traveling bubbles), (б.2) $\sigma=1$, $L_c/C=0,54$ (transitional regime), (б.3) $\sigma=0,89$, $L_c/C=0,66$ (transitional regime), (б.4) $\sigma=0,82$, $L_c/C=1,06$, $St=0,07$ (unsteady cavity). $\alpha=3^\circ$. The flow direction is from the top

При $\alpha=3^\circ$ переходные режимы кавитации, характеризующиеся относительно постоянной длиной присоединенной каверны и отрывами подковообразных облаков в области ее замыкания, наблюдались в следующих диапазонах числа кавитации: $1,13 > \sigma > 1,1$ на модели НЛ (рис. 2, а.2) и $1,05 > \sigma > 0,89$ на гидрокрыле NASA (рис. 2, б.2, б.3). На этих режимах нижняя поверхность перемещающихся пузырей часто выглядит сильно возмущенной в отличие от случая пузырьковой кавитации (рис. 2, а.1, б.1). В соответствии с [17] это происходит, когда пузыри движутся над турбулентным пограничным слоем. Вследствие повышенного уровня турбулентных флуктуаций скорости жидкости в пограничном слое близкая к нему часть поверхности пузыря может деформироваться и разрушаться, растягиваясь вдоль поверхности тела обтекания и тем самым создавая локально за пузырем (выше по течению) парогазовую пленку – зону фрагментарной кавитации. Ниже по течению кавитационные пузыри коалесцируют, формируя единую кавитационную каверну по всему размаху гидрокрыла, а затем схлопываются. В области замыкания каверны формируются относительно малые газопаровые облака вследствие захвата вихревыми структурами микропузырьков, возникающих при коллапсе относительно больших перемещающихся пузырей, затем эти облака уносятся основным потоком. Отрыв облаков происходит случайно в продольном и поперечном направлениях, то есть положения областей формирования парогазовых облаков не фиксированы в пространстве, а изменяются стохастически.

Переход к неустойчивым режимам, когда присоединенная каверна начинает периодически осциллировать, происходит раньше (при меньшем изменении числа кавитации, начиная от режима зарождения кавитации) на профиле НЛ в сравнении с крылом NASA, то есть $\sigma_c - \sigma_u = 1,23 - 1,11 = 0,12$ для НЛ и $1,22 - 0,89 = 0,33$ для гидрокрыла NASA0015. При $\alpha=3^\circ$ длина каверны для всех рассматриваемых нестационарных режимов на обоих

гидропрофилях (рис. 2, а.3, а.4, б.4) находится в диапазоне значений $L_c = 0,7 - 1,1C$, а характерные числа Струхала, соответствующие этим режимам, имеют значения близкие к 0,1. Это означает, что во всех этих случаях характер изменения присоединенной каверны полностью подчиняется внешним (системным), а не внутренним (естественным) неустойчивостям, которые определяют динамику облачной кавитации (более детальное описание дано в [16, 19]). Стоит отметить, что при $\sigma=0,9$ зарегистрированный отрыв вторичного облака на модели НЛ (обведено красной пунктирной линией на рис. 2, а.4) перед схлопыванием каверны совершенно не характерен для данного типа нестационарности. Вероятно, он вызван действием сильного неблагоприятного градиента давления в данной области, величина которого определяется формой профиля НЛ. В любом случае отрыв подобного облака на схожих двумерных гидрокрыльях ранее в других работах не наблюдался. Более подробное описание режима, представленного на рис. 2, а.4, дано ниже. На гидрокрыле NASA присоединенная каверна после достижения своей максимальной длины разрушается на маленькие подковообразные облака (рис. 2, б.4). Таким образом, режимы облачной кавитации никогда не реализуются на обоих гидропрофилях при малых углах атаки. Более подробное описание пространственной структуры кавитационных каверн для гидрокрыла NASA0015 при различных углах атаки можно найти в [16, 20].

Временная эволюция нестационарной каверны для режима, соответствующего рис. 2, а.4, в течение одного периода крупномасштабных пульсаций представлена на рис. 4. В начальный момент времени ($t=0$ мс) каверна полностью отсутствует. При $t=4$ мс кавитация возникает в форме перемещающихся пузырей. Можно выделить две характерные кавитационные зоны в продольном направлении: первая из них (расположенная выше по потоку) находится между $x/C=0,1$ и $0,24$, другая – между сечениями $x/C=0,3$ и $0,45$. В первой зоне

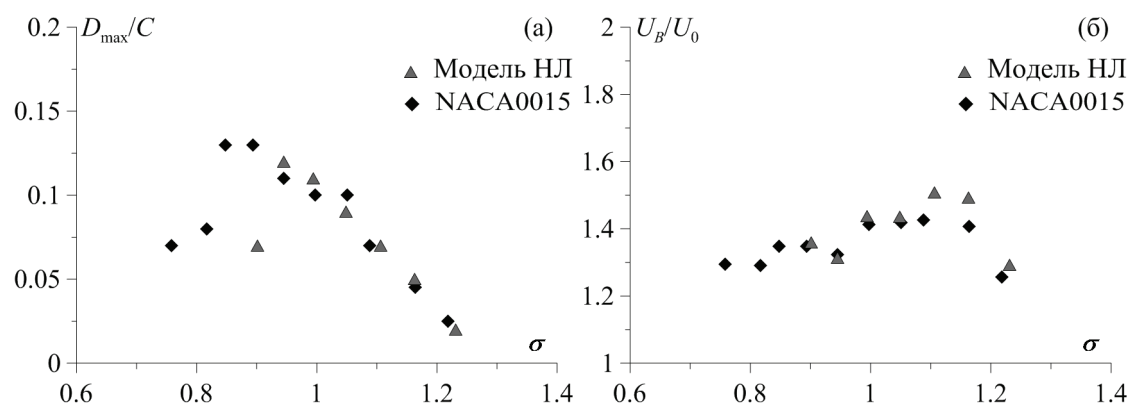


Рис. 3. Зависимость: а) среднего диаметра и б) усредненной конвективной скорости кавитационных пузырей от числа кавитации: \blacktriangle – НЛ, \blacklozenge – NASA0015. $\alpha=3^\circ$

Fig. 3. Dependence of: а) the mean diameter and б) the average convective velocity of traveling bubbles on the cavitation number: \blacktriangle – GV, \blacklozenge – NASA0015. $\alpha=3^\circ$

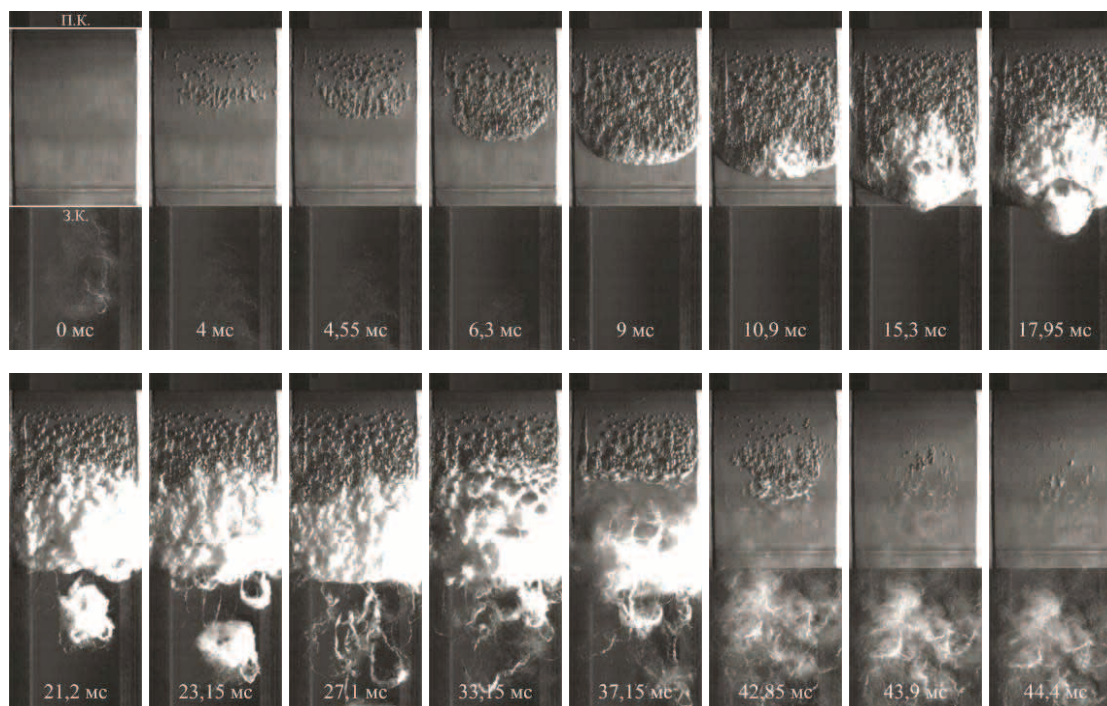


Рис. 4. Временная эволюция нестационарной кавитационной каверны (вид сверху) со стороны разрежения модели НЛ при $\alpha=3^\circ$ для $\sigma=0,9$ ($L_c/C=1,07$, $St=0,12$, $T=50,3$ мс). Направление потока – сверху вниз

Fig. 4. Temporal evolution of an unsteady partial cavity (top view) on the suction side of the GV model at $\alpha=3^\circ$ for $\sigma=0,9$ ($L_c/C=1,07$, $St=0,12$, $T=50,3$ ms). The flow direction is from the top

наблюдается обычная пузырьковая кавитация. Во второй зоне появляются локальные области фрагментарной кавитации, возникающие при взаимодействии перемещающихся кавитационных пузырей с турбулентным пограничным слоем (подробности даны в [17]). Далее каверна растет со временем. Эти две отдельных кавитационных зоны полностью сливаются при $t=6,3$ мс.

При $t=9$ мс начинает развиваться возвратное течение вдоль центрального сечения гидропрофиля, постепенно распространяясь вверх по течению и в стороны. Когда длина присоединенной каверны достигает $L_c/C=0,93$ или, другими словами, когда задняя кромка каверны совпадает с задней кромкой НЛ (это действительно так: длина каверны $L_c/C < 1$, но в то же время задние кромки каверны и гидропрофиля совпадают, потому что передняя кромка присоединенной каверны зачастую немного смещена вниз по потоку относительно передней кромки гидрокрыла) при $t=15,3$ мс, облако с характерным продольным размером $0,36C$ отрывается от задней части лопатки и уносится вниз по потоку (рис. 4). В момент времени $t=21,12$ мс, каверна достигает своего максимального размера ($L_c/C=1,07$), который сохраняется вплоть до $t=27,1$ мс. Когда $t=23,15$ мс, за задней кромкой модели НЛ появляются интенсивные продольные кавитирующие вихревые жгуты, которые хорошо видны на рис. 4 при $t=27,1$ мс.

После этого при $t=33,15$ мс длина каверны начинает сокращаться, и от нее отрывается большое

облако неправильной формы (продольный размер составляет около $0,71C$). Однако когда облачная каверна уносится вниз по течению ($t=37,15$ мс), на НЛ остается пузырьковая часть присоединенной каверны. В конце концов, оставшаяся часть каверны исчезает в направлении от боковых стенок канала к центральному сечению модели НЛ, сначала немного увеличиваясь в продольном направлении. Это предположительно связано с перераспределением локального давления: оно может возрастать на боковых стенках и уменьшаться в центральной части рабочего канала. При $t=42,85$ мс можно наблюдать картину, подобную начальному состоянию цикла осцилляций каверны при $t=4-4,55$ мс, когда оставшаяся часть кавитационной каверны снова разделяется на две зоны в продольном направлении. Находящаяся выше по течению зона с кавитационными пузырями меньшего масштаба исчезает раньше при $t=43,9$ мс. Полный цикл данного процесса заканчивается приблизительно в момент времени $t=44,4$ мс.

Большой угол атаки

При $\alpha=9^\circ$ кавитация на модели НЛ возникает примерно при $\sigma=2,87$ как массив продольных структур – стриков (англ. streaks). Их длина достаточно мала $\approx 0,02C$, поэтому этот режим не представлен. На гидрокрыле NASA0015 зарождение происходит при $\sigma=3,03$ в виде нерегулярных вытянутых по потоку пузырей (рис. 5, б.1), их длина составляет примерно $0,08C$. Напротив, регуляр-

ные стрики на НЛ расположены очень близко друг к другу и формируют кавитационную каверну по всей ширине крыла. При $\sigma=2,49$ длина присоединенной каверны на НЛ увеличивается до $L_c/C=0,16$ (рис. 5, а.1). Уменьшение числа кавитации до $\sigma=2,73$ и далее до 2,48 (рис. 5, б.2) приводит к изменению типа кавитации на гидрокрыле НАСА на стриковую, так что образуется единая каверна ($L_c/C=0,24$). Ниже по течению стрики превращаются в маленькие облака (рис. 5, б.2). Не принимая во внимание те нерегулярные вытянутые пузыри на гидропрофиле НАСА, структура каверн на обоих телах при большом угле атаки оказывается стриковой. Стриковые структуры увеличиваются в продольном направлении при уменьшении числа кавитации (подробное объяснение причины возникновения стриковой кавитации дано в [16]). Они растут, взаимодействуют и объединяются в каверны или мгновенно превращаются в облака в зависимости от значения σ (рис. 5). С уменьшением σ это изменение становится более внезапным и резким.

При $\sigma=2,25$ (рис. 5, а.2) можно наблюдать переходный режим кавитационного обтекания на модели НЛ, длина каверны составляет $0,37C$. При этих условиях начинает развиваться возвратное течение вдоль центрального сечения профиля сначала в области замыкания каверны, а затем продвигается вверх по течению и распространяется в стороны. При этом отделенная от поверхности профиля часть присоединенной каверны, под которой развивается возвратное течение, образует равнобедренный треугольник (показан красными пунктирными линиями на рис. 5, а.2). Однако на данном режиме возвратное течение никогда не достигает передней кромки каверны и поэтому не разрушает межфазную границу каверны. Вместе с тем, иногда появляются две области отрыва каверны (также в форме треугольников) симметрично по отношению к центральному сечению профиля. Их вершины расположены на расстоянии, равном примерно четверти ширины гидрокрыла, которая составляет 80 мм, от его центрального сечения. На переходном режиме на гидрокрыле НАСА0015 при $\alpha=9^\circ$ пространственная структура каверны существенно отличается, а длина каверны значительно уменьшается по сравнению со случаем $\alpha=3^\circ$ (рис. 2, б.2, б.3 и 5-б.3).

Переход к нестационарным режимам на обоих гидрокрыльях происходит раньше (при меньшем изменении σ) для больших углов атаки. При $\alpha=9^\circ$ такой переход наблюдается при уменьшении числа кавитации до значения $\sigma=2,05$ как на НЛ, так и на гидрокрыле НАСА0015. Все нестационарные режимы, зарегистрированные на гидрокрыльях, сопровождающиеся квазипериодическими отрывами больших облачных каверн от поверхности гидропрофиля вследствие развития возвратного течения под присоединенной каверной, которое разрушает межфазную границу каверны при достижении ее передней кромки, относятся к режимам облачной

кавитации. Это, в свою очередь, означает, что внутренние или естественные неустойчивости полностью определяют поведение присоединенной каверны при больших углах атаки на обоих гидрокрыльях. Характерное число Струхала для гидрокрыла НАСА0015 составляет $St=0,47$ при $\sigma=1,86$ (рис. 5, б.4), тогда как для профиля НЛ $St=0,35$ при том же числе кавитации (рис. 5, а.3). Более того, когда число кавитации было уменьшено до значения $\sigma=1,69$, на модели НЛ был обнаружен новый вид облачной неустойчивости с $St=0,55$ (рис. 5, а.4). Эволюция данного режима во времени описана ниже. Кроме того, в следующем разделе приведено сравнение интегральных параметров для данного режима и других нестационарных режимов.

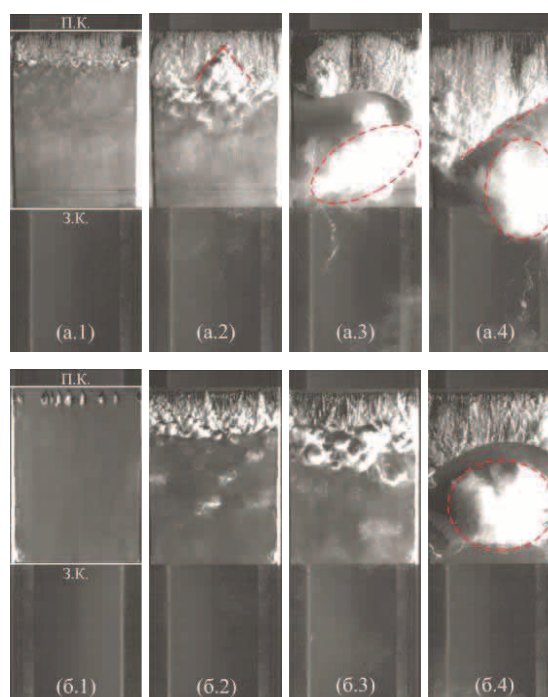


Рис. 5. Мгновенные изображения кавитационных каверн (вид сверху) со стороны разрежения (а) направляющей лопатки при (а.1) $\sigma=2,49$, $L_c/C=0,16$ (присоединенная каверна), (а.2) $\sigma=2,25$, $L_c/C=0,37$ (переходный режим), (а.3) $\sigma=1,86$, $L_c/C=0,77$, $St=0,29$ (облачная кавитация), (а.4) $\sigma=1,69$, $L_c/C=0,8$, $St=0,55$ (новый тип облачной кавитации) и (б) гидрокрыла НАСА0015 при (б.1) $\sigma=3,03$, $L_c/C=0,075$ (отдельные пузыри-перышки), (б.2) $\sigma=2,48$, $L_c/C=0,24$ (присоединенная каверна), (б.3) $\sigma=2,26$, $L_c/C=0,33$ (переходный режим), (б.4) $\sigma=1,86$, $L_c/C=0,5$, $St=0,47$ (облачная кавитация). $\alpha=9^\circ$. Направление потока – сверху вниз

Fig. 5. Instant images of partial cavities (top view) on the suction side of (a) the guide vane at (a.1) $\sigma=2,49$, $L_c/C=0,16$ (attached cavity), (a.2) $\sigma=2,25$, $L_c/C=0,37$ (transitional regime), (a.3) $\sigma=1,86$, $L_c/C=0,77$, $St=0,29$ (cloud cavitation), (a.4) $\sigma=1,69$, $L_c/C=0,8$, $St=0,55$ (new type of cloud cavitation) and (b) the NACA0015 hydrofoil at (b.1) $\sigma=3,03$, $L_c/C=0,075$ (elongated bubbles), (b.2) $\sigma=2,48$, $L_c/C=0,24$ (attached cavity), (b.3) $\sigma=2,26$, $L_c/C=0,33$ (transitional regime), (b.4) $\sigma=1,86$, $L_c/C=0,5$, $St=0,47$ (cloud cavitation). $\alpha=9^\circ$. The flow direction is from the top

Динамика каверны, обусловленная развитием нового типа облачной неустойчивости, представлена на рис. 6 за два полных периода осцилляции длины каверны (соответствует режиму на рис. 5, а.4). В самом начале цикла ($t=0$ мс) над задней кромкой лопатки можно наблюдать облачную каверну размером около $0,5C$, смещенную к правой боковой стенке рабочего канала. Под левой (более длинной) частью присоединенной каверны развивается возвратное течение. Задняя кромка присоединенной каверны в каждый момент времени наклонена к стенкам рабочего канала и, следовательно, направлению течения под углом $50-60^\circ$. На всех изображениях рис. 6 задняя кромка каверны отмечена красной пунктирной линией. Длина присоединенной каверны изменяется в диапазоне $L_c/C=0,39-0,78$ по размаху гидропрофиля. При $t=7,55$ мс облачная каверна сносится вниз по течению на расстояние порядка ее размера, а также незначительно вытягивается в направлении течения. Концентрация парогазовой смеси в каверне значительно сокращается. В то же время длина присоединенной каверны увеличивается и достигает максимального размера $0,76C$ с правой стороны рабочего канала, а с левой стороны возвратное течение достигает передней кромки каверны и раз-

рушает ее границу. На последующих изображениях рис. 6 показан процесс отрыва облака и его унос основным течением с левой стороны канала. При $t=11,9$ мс под правой частью присоединенной каверны начинает развиваться возвратное течение, которое достигает передней кромки каверны приблизительно в момент времени $t=18,65$ мс. Через $28,25$ мс после начала цикла присоединенная каверна снова достигает своего максимального размера, но теперь слева. Затем весь этот процесс целиком повторяется.

Интегральные характеристики

Как было показано ранее в [16, 19], внешние и естественные неустойчивости характеризуются различными диапазонами чисел Струхала для различных симметричных двумерных тел обтекания, включая гидрокрыло NACA0015 (рис. 7, б). Для нестационарных режимов кавитации, динамика которых определяется внутренними неустойчивостями, числа Струхала лежат в диапазоне $St=0,3-0,45$. В случаях, когда преобладают системные неустойчивости, числа Струхала, как правило, распределены в интервале $St=0,05-0,2$. Аналогичное разделение областей по числам Струхала было зарегистрировано и для модели НЛ (рис. 7, а).

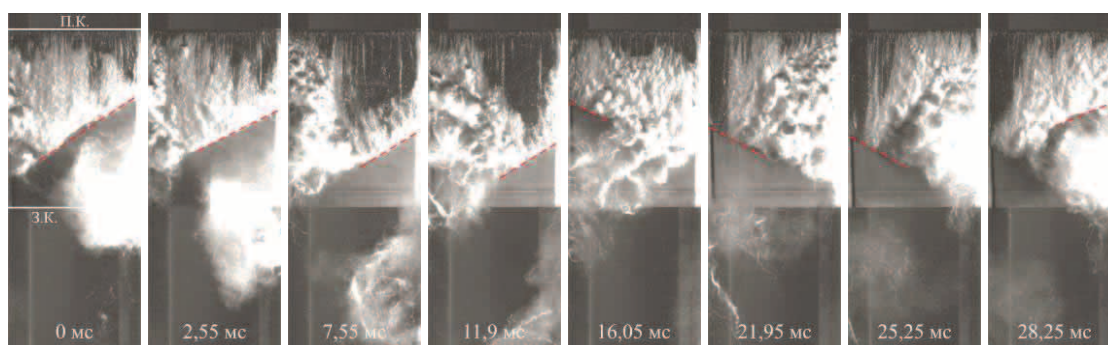


Рис. 6. Временная последовательность цикла роста/сокращения за два периода пульсаций нестационарной кавитационной каверны со стороны разрежения модели НЛ (вид сверху) при $\alpha=9^\circ$ для $\sigma=1,69$ ($L_c/C=0,8$, $St=0,55$, $T=14,05$ мс). Направление потока – сверху вниз

Fig. 6. Time-series of the growth/reduction cycle within two periods of an unsteady partial cavity pulsations (top view) on the suction side of the GV model at $\alpha=9^\circ$ for $\sigma=1,69$ ($L_c/C=0,8$, $St=0,55$, $T=14,05$ ms). The flow direction is from the top

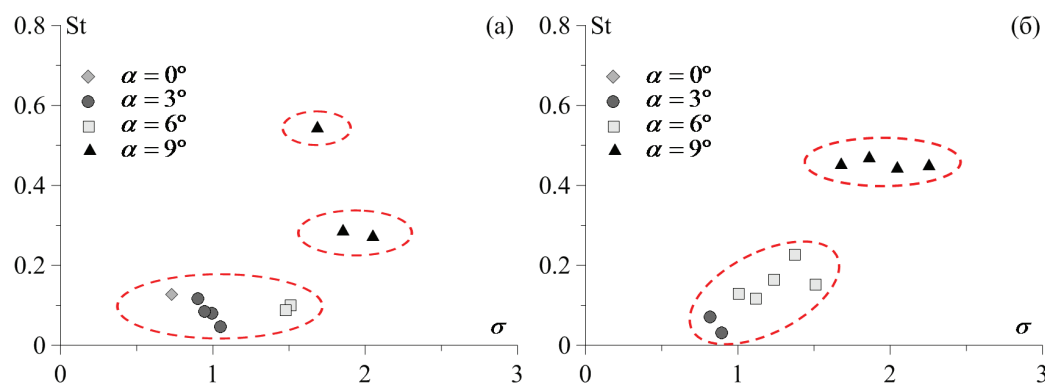


Рис. 7. Числа Струхала в зависимости от числа кавитации для: а) модели НЛ и б) гидрокрыла NACA0015

Fig. 7. Dependence of Strouhal number on the cavitation number for: a) the GV model and б) NACA0015 hydrofoil

Новый тип облачной неустойчивости для модели НЛ также характеризуется периодическими отрывами облаков, возникающих в области замыкания каверны вследствие развития возвратного течения, как при обычной облачной кавитации (рис. 5, а.4). Главной особенностью данного типа неустойчивости является то, что процесс отрыва облаков носит преимущественно трехмерный характер с существенным влиянием стенок канала: отрыв сначала происходит с одной стороны лопатки (от центрального сечения канала до одной из его стенок), а затем – на другой. Для данного режима характерное число Струхала равно 0,55 (рис. 7, а).

Следовательно, в целом этот процесс можно рассматривать как высшую гармонику стандартного процесса облачной кавитации (описан в [7, 15, 19]), протекающий на удвоенной частоте. Это означает, что в натуральных условиях стенки спиральной каме-

ры и направляющего аппарата могут значительно влиять на динамику течения и генерировать дополнительные виды нестационарностей в контуре гидротурбины, которые, весьма вероятно, существенно ухудшают ее рабочие характеристики.

Распределения скорости

На рис. 8–11 представлены нормированные профили продольной компоненты средней скорости (в виде дефекта скорости $(U-U_0)/U_0$, рис. 8 и 10) и флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения, рис. 9 и 11) в нескольких поперечных сечениях для обоих тел обтекания. Сравнение распределений скоростных характеристик приводится для докавитационного режима, а также пузырькового или стрикового, переходного режимов и облачной кавитации при $\alpha=3^\circ$ (рис. 8 и 9) и $\alpha=9^\circ$ (рис. 10 и 11). Межфазная

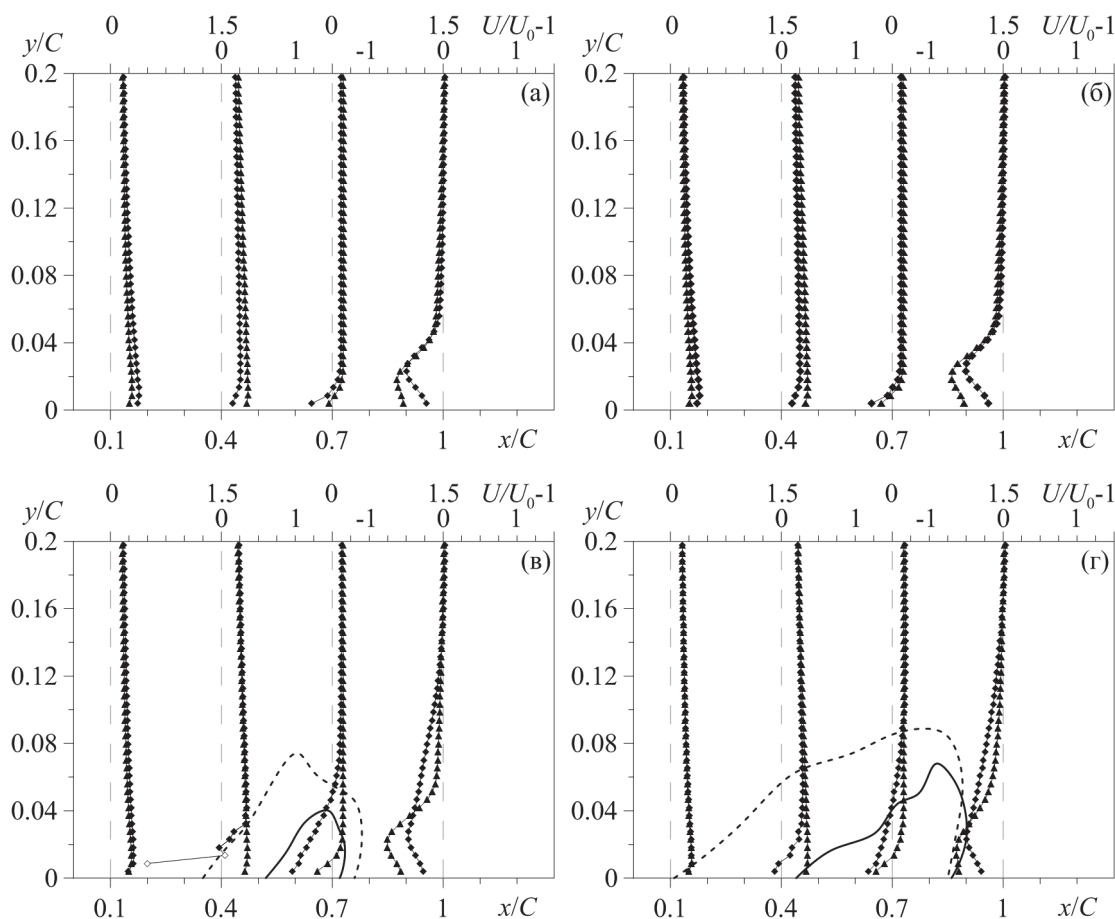


Рис. 8. Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по течению для (а) докавитационного режима при $\sigma=1,35$ (НЛ) и $1,36$ (NACA0015), (б) пузырьковой кавитации при $\sigma=1,23$ (НЛ) и $1,22$ (NACA0015), (в) переходного режима при $\sigma=1,11$ (НЛ) и 1 (NACA0015) и (г) нестационарного режима при $\sigma=0,99$ (НЛ) и переходного режима при $\sigma=0,89$ (NACA0015). $\alpha=3^\circ$. \blacktriangle – НЛ и \blacklozenge – NACA0015. Сплошная и пунктирная линии соответствуют осредненным по времени межфазным границам каверн (из визуальных данных) на модели НЛ и гидрокрыле NACA0015 соответственно. Направление потока – слева направо

Fig. 8. Downstream evolution of the streamwise component of the mean velocity for (a) cavitation-free regime at $\sigma=1,35$ (GV) and $1,36$ (NACA0015), (б) traveling bubbles at $\sigma=1,23$ (GV) and $1,22$ (NACA0015), (в) transitional regime at $\sigma=1,11$ (GV) and 1 (NACA0015) and (г) unsteady cavity at $\sigma=0,99$ (GV) and transitional regime at $\sigma=0,89$ (NACA0015). $\alpha=3^\circ$. \blacktriangle – GV and \blacklozenge – NACA0015. Solid and dashed lines correspond to the time-averaged cavity interfaces (extracted from the visual data) on the GV model and NACA0015 hydrofoil, respectively. The flow direction is from the left

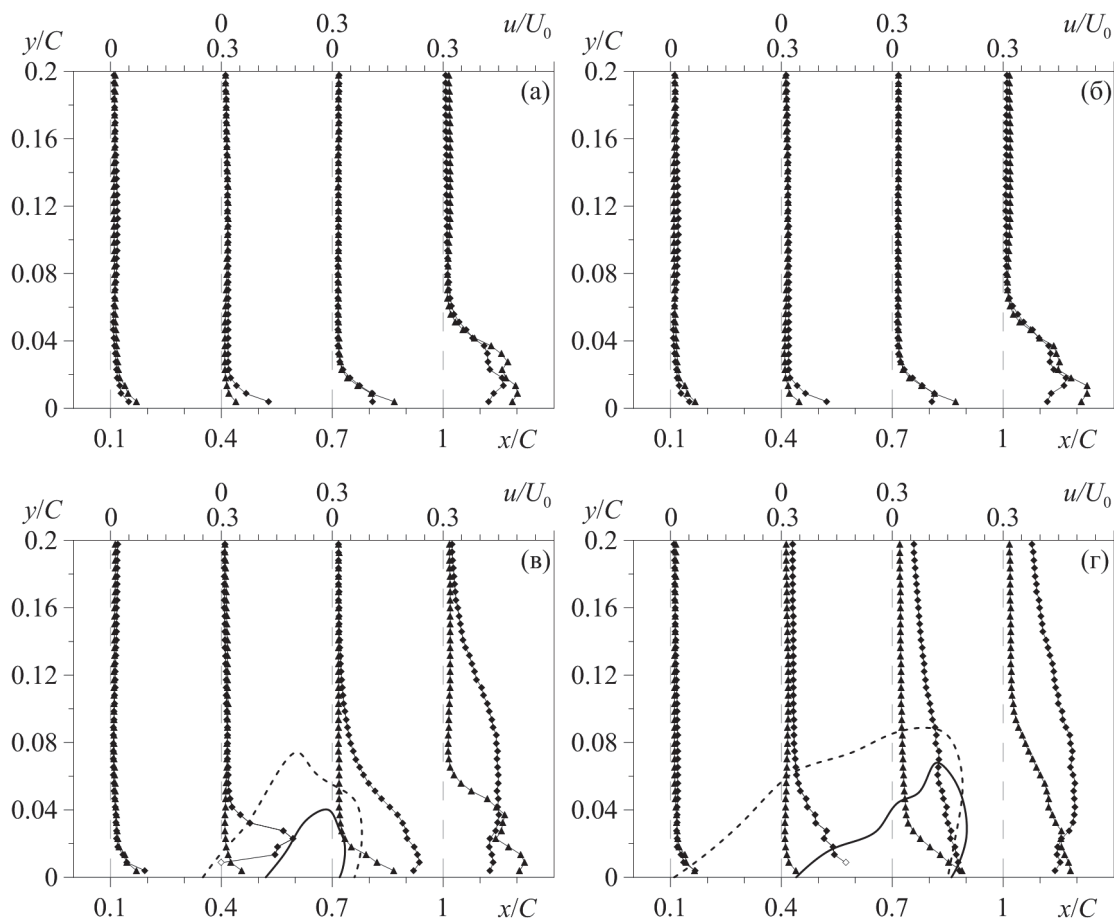


Рис. 9. Эволюция продольной компоненты флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения) вниз по течению для (а) докавитационного режима при $\sigma=1,35$ (НЛ) и $1,36$ (NACA0015), (б) пузырьковой кавитации при $\sigma=1,23$ (НЛ) и $1,22$ (NACA0015), (в) переходного режима при $\sigma=1,11$ (НЛ) и 1 (NACA0015) и (г) нестационарного режима при $\sigma=0,99$ (НЛ) и переходного режима при $\sigma=0,89$ (NACA0015). $\alpha=3^\circ$. \blacktriangle – НЛ и \blacklozenge – NACA0015. Сплошная и пунктирная линии соответствуют осредненным по времени межфазным границам каверн (из визуальных данных) на модели НЛ и гидрокрыле NACA0015 соответственно. Направление потока – слева направо

Fig. 9. Downstream evolution of the streamwise component of the fluctuating velocity (root-mean-square values) for (a) cavitation-free regime at $\sigma=1,35$ (GV) and $1,36$ (NACA0015), (б) traveling bubbles at $\sigma=1,23$ (GV) and $1,22$ (NACA0015), (в) transitional regime at $\sigma=1,11$ (GV) and 1 (NACA0015) and (г) unsteady cavity at $\sigma=0,99$ (GV) and transitional regime at $\sigma=0,89$ (NACA0015). $\alpha=3^\circ$. \blacktriangle – GV and \blacklozenge – NACA0015. Solid and dashed lines correspond to the time-averaged cavity interfaces (extracted from the visual data) on the GV model and NACA0015 hydrofoil, respectively. The flow direction is from the left

граница присоединенной каверны, осредненная по времени путем подсчета суммарной интенсивности мгновенных визуальных изображений (вид сбоку) по всему размеру выборки (обычно 20 000) для каждого пикселя, также отображена на графиках для всех режимов в виде сплошной (для модели НЛ) и пунктирной (для гидрокрыла NACA0015) линий. Пустые точки соответствуют значениям с большей погрешностью (оценка погрешности дана в [16]). Точка начала координат совпадает с положением передней кромки гидрокрыла в измерительной плоскости при $\alpha=0^\circ$.

Малый угол атаки

При $\alpha=3^\circ$ толщина слоя смешения в случае однофазного потока одинакова для обоих гидрокрыльев (рис. 8, а) и достигает приблизительно $0,06C$ в

сечении $x/C=1$. Однако ниже по течению при $x/C>0,28$ (рис. 1, табл. 1) локальная скорость в пограничном слое над НЛ становится немного больше (например, $\Delta U/U_0=0,04$ в точке $x/C=0,4$; $y/C=0,0065$), но вблизи задней кромки, наоборот, меньше ($\Delta U/U_0=-0,3$ при $x/C=1$; $y/C=0,02$) по сравнению с гидрокрылом NACA0015. ΔU и Δu положительны, когда средняя и флуктуационная скорости над моделью НЛ выше, чем над гидрокрылом NACA0015, и отрицательны в обратном случае. Уровень флуктуаций скорости, наоборот, выше над гидрокрылом NACA ($\Delta u/U_0=-0,1$ при $x/C=0,4$; $y/C=0,001$) и ниже вблизи задней кромки ($\Delta u/U_0=0,05$ при $x/C=1$; $y/C=0,018$), чем в случае модели НЛ (рис. 9, а). Это, судя по всему, связано с более интенсивной турбулизацией пограничного слоя вблизи задней кромки НЛ. В сечении

$x/C=0,1$ средняя скорость течения немного выше для крыла NACA ($\Delta U/U_0=-0,05$ при $x/C=0,1$; $y/C=0,005$), так как радиус округления носовой части гидрокрыла NACA0015 больше (рис. 1). При пузырьковой кавитации (рис. 8, б) профили скоростей практически не претерпевают изменений и в рассматриваемых двух случаях почти совпадают, но разница локальных скоростей в пределах слоя смещения увеличивается до $\Delta U/U_0=-0,37$ в точке $x/C=1$; $y/C=0,001$.

Для развитых кавитационных режимов (рис. 8, в, г) максимальная толщина пограничного слоя увеличивается до значений $0,12-0,14C$ над задней кромкой обоих гидрокрыльев. В сечении $x/C=1$ скорость по-прежнему меньше над НЛ ($\Delta U/U_0=-0,27$ и $-0,23$ для переходного и неустойчивого режимов соответственно, рис. 8, в, г) вблизи поверхности ($y/C<0,03-0,04$). Максимальная

разница достигает $0,47U_0$ в точке $x/C=0,7$; $y/C=0,019$. Однако вдали от поверхности ($y/C>0,04$) в том же сечении профили скорости изменяются, так что скорость над крылом NACA становится меньше, чем над НЛ ($\Delta U/U_0=0,47$), то есть в случае гидрокрыла NACA0015 пограничный слой возмущен сильнее. Наиболее вероятно это объясняется тем, что в среднем присоединенная каверна на модели НЛ имеет меньший размер по сравнению с крылом NACA (рис. 8, в, г). Из-за различия форм двух тел передняя кромка каверны на НЛ расположена ниже по течению относительно передней кромки лопатки, а сама каверна тоньше по сравнению со случаем гидрокрыла NACA0015. Это приводит к более интенсивной турбулизации пограничного слоя над крылом NACA внутри и за присоединенной каверной вследствие развития неустойчивости ее задней части. По этой причине

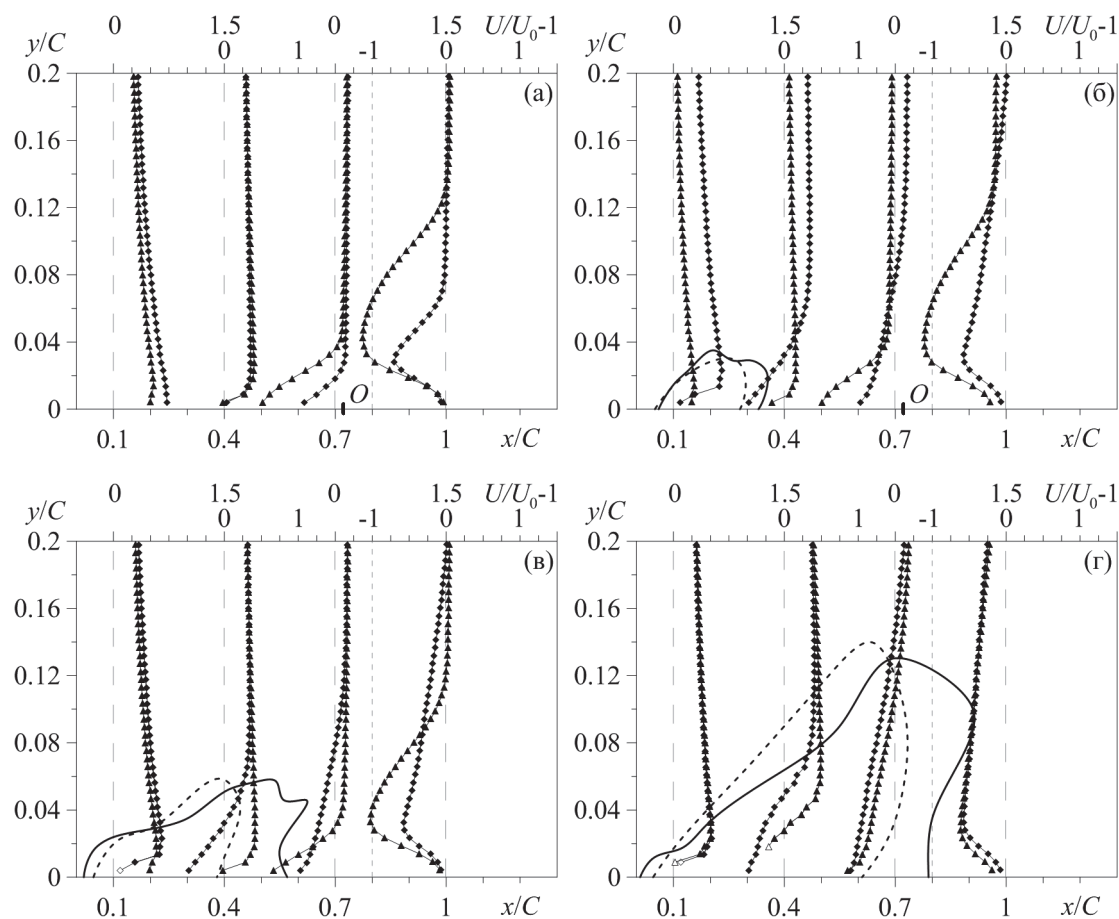


Рис. 10. Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по течению для (а) докавитационного режима при $\sigma=3,41$ (НЛ) и $3,35$ (NACA0015), (б) присоединенной каверны при $\sigma=2,49$ (НЛ) и $2,48$ (NACA0015), (в) переходного режима при $\sigma=2,25$ (НЛ) и $2,26$ (NACA0015) и (г) облачной кавитации при $\sigma=1,86$ на обоих гидропрофилях. $\alpha=9^\circ$. \blacktriangle – НЛ и \blacklozenge – NACA0015. Сплошная и пунктирная линии соответствуют осредненным по времени межфазным границам каверн (из визуальных данных) на модели НЛ и гидрокрыле NACA0015 соответственно. O – точка отрыва потока от поверхности НЛ. Направление потока – слева направо

Fig. 10. Downstream evolution of the streamwise component of the mean velocity for (a) cavitation-free regime at $\sigma=3,41$ (GV) and $3,35$ (NACA0015), (б) attached cavity at $\sigma=2,49$ (GV) and $2,48$ (NACA0015), (в) transitional regime at $\sigma=2,25$ (GV) and $2,26$ (NACA0015) and (г) cloud cavitation cavity at $\sigma=1,86$ on both hydrofoils. $\alpha=9^\circ$. \blacktriangle – GV and \blacklozenge – NACA0015. Solid and dashed lines correspond to the time-averaged cavity interfaces (extracted from the visual data) on the GV model and NACA0015 hydrofoil, respectively. O is the point of flow separation from the GV surface. The flow direction is from the left

средняя локальная скорость в пограничном слое за каверной над крылом *NACA0015* меньше ($U/U_0=0,25$), а флуктуации скорости соответственно больше ($u/U_0=0,15$ и $0,2$ для соответственно переходного и нестационарного режимов кавитации, рис. 9, в, г).

Большой угол атаки

Как только угол атаки крыльев увеличивается до 9° , поперечный размер пограничного слоя над моделью НЛ в сечении $x/C=1$ в случае однофазного течения становится примерно в два раза больше, чем при $\alpha=3^\circ$ (рис. 10, а). Для гидрокрыла *NACA0015* при $\alpha=9^\circ$ в докавитационном случае поперечный размер пограничного слоя в том же сечении составляет $0,08C$, что очень близко к случаю $\alpha=3^\circ$. Такая значительная модификация пограничного слоя над моделью НЛ вызвана отрывом

потока от его поверхности в сечении $x/C \approx 0,71$, что также приводит к появлению второго максимума в распределениях флуктуаций скорости над задней кромкой лопатки (в области $y/C=0,1$). Амплитуда турбулентных флуктуаций скорости увеличивается до $u/U_0=0,3$ в следе ($x/C > 1$) за моделью НЛ (рис. 11, а). Амплитуда второго максимума несколько меньше и составляет около $u/U_0=0,25$. Также стоит отметить, что сразу перед отрывом потока на НЛ амплитуда флуктуаций скорости возрастает почти в два раза ($u/U_0=0,2$), по сравнению с гидрокрылом *NACA0015* в том же сечении ($u/U_0=0,13$). Зарождение кавитации приводит к некоторым изменениям в распределениях скорости над обоими гидропрофилями, но главные особенности остаются прежними (рис. 8, б и 10, б, 9, б и 11, б). В отличие от случая $\alpha=3^\circ$, когда появляются только перемежающиеся пузыри, кавитация на модели НЛ

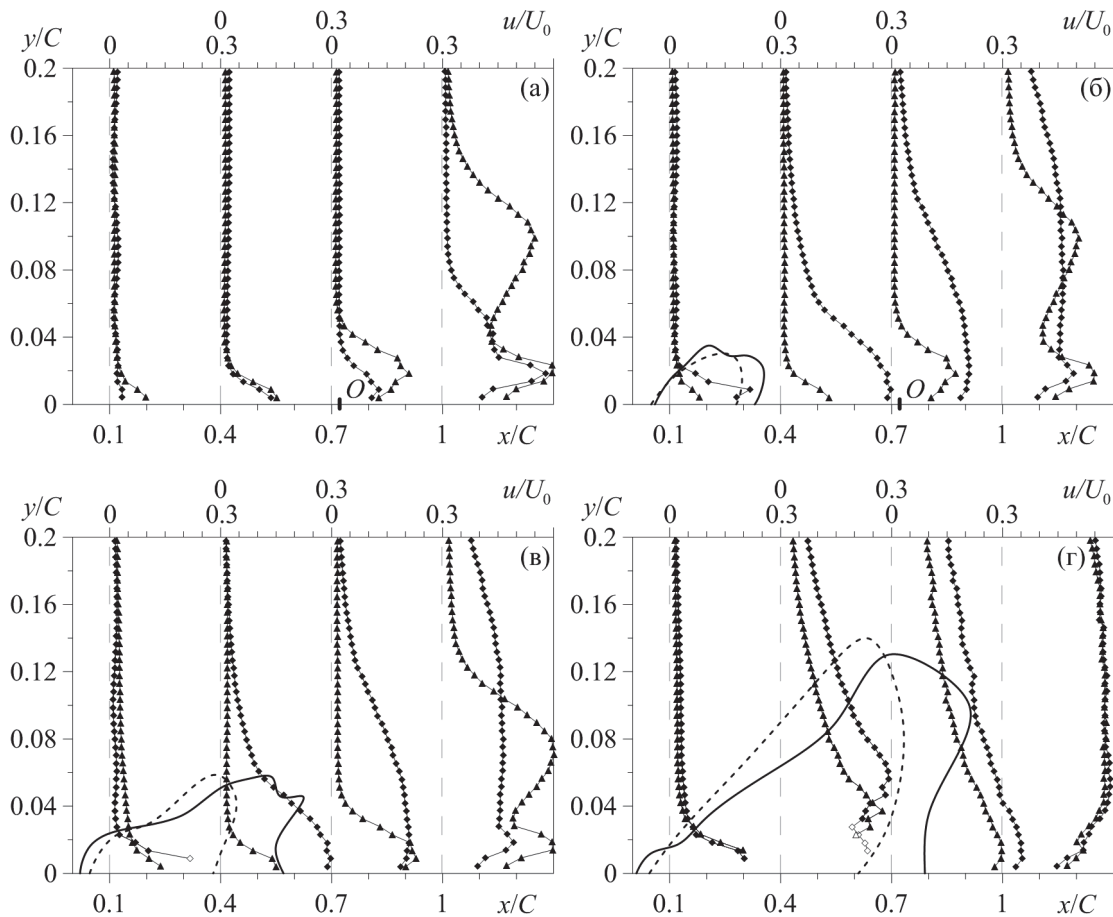


Рис. 11. Эволюция продольной компоненты флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения) вниз по течению для (а) докавитационного режима при $\sigma=3,41$ (НЛ) и $3,35$ (*NACA0015*), (б) присоединенной каверны при $\sigma=2,49$ (НЛ) и $2,48$ (*NACA0015*), (в) переходного режима при $\sigma=2,25$ (НЛ) и $2,26$ (*NACA0015*) и (г) облачной кавитации при $\sigma=1,86$ на обоих гидропрофилях. $\alpha=9^\circ$. \blacktriangle – НЛ и \blacklozenge – *NACA0015*. Сплошная и пунктирная линии соответствуют осредненным по времени межфазным границам каверн (из визуальных данных) на модели НЛ и гидрокрыле *NACA0015* соответственно. *O* – точка отрыва потока от поверхности НЛ. Направление потока – слева направо.

Fig. 11. Downstream evolution of the streamwise component of the fluctuating velocity (root-mean-square values) for (a) cavitation-free regime at $\sigma=3,41$ (GV) and $3,35$ (*NACA0015*), (б) attached cavity at $\sigma=2,49$ (GV) and $2,48$ (*NACA0015*), (в) transitional regime at $\sigma=2,25$ (GV) and $2,26$ (*NACA0015*) and (г) cloud cavitation cavity at $\sigma=1,86$ on both hydrofoils. $\alpha=9^\circ$. \blacktriangle – GV and \blacklozenge – *NACA0015*. Solid and dashed lines correspond to the time-averaged cavity interfaces (extracted from the visual data) on the GV model and *NACA0015* hydrofoil, respectively. *O* is the point of flow separation from the GV surface. The flow direction is from the left

при $\alpha=9^\circ$ возникает сразу за передней кромкой, а размеры присоединенных каверн на НЛ и гидрокрыле НАСА0015 почти совпадают.

При дальнейшем развитии кавитации (рис. 10, в, з) распределения скорости существенно изменяются, а точку отрыва на поверхности НЛ становится невидно вследствие постоянного изменения ее своего положения. Более того, длина кавитационной каверны на модели НЛ становится больше приблизительно на 25 % по сравнению с гидрокрылом НАСА0015. Для переходных режимов (рис. 10, в) в сечении $x/C=0,1$ профили скорости почти совпадают за исключением пристенной области ($y/C<0,02$), где скорость существенно ниже в случае гидрокрыла НАСА0015. Ниже по течению ($x/C>0,4$), где профиль НЛ имеет максимальную толщину, разница между значениями скоростей увеличивается до $\Delta U/U_0=1$ в пределах пограничного слоя ($y/C<0,08$). Вместе с тем флуктуации скорости в пограничном слое над крылом НАСА возрастают до $u/U_0=0,3$ и становятся в два раза больше, чем над НЛ (рис. 11, в). Далее вниз по течению ($x/C=0,7$ и $1,0$) скорость над НЛ становится меньше, чем над крылом НАСА ($\Delta U/U_0=-0,33$ при $x/C=0,7$ и $\Delta U/U_0=-0,5$ при $x/C=1$) для $y/C<0,09-0,12$, но остается больше вдали от поверхности ($\Delta U/U_0=0,33$ при $x/C=0,7$ и $\Delta U/U_0=0,17$ при $x/C=1$). Это связано с разностью распределений давления вдоль поверхности гидропрофилей, которые определяют значение скорости на внешней границе пограничного слоя. Амплитуды флуктуаций скорости для обоих гидропрофилей в пристенной области очень близки в сечении $x/C=0,7$ ($u/U_0=0,23$). Однако они значительно возрастают при удалении от поверхности ($y/C>0,02$) крыла НАСА, поскольку толщина пограничного слоя над крылом НАСА примерно в три раза больше (около $0,12C$), чем на НЛ ($0,04C$). Вблизи задней кромки модели НЛ (рис. 11, в) флуктуации скорости увеличиваются до $u/U_0=0,3$, что примерно в полтора раза больше, чем над гидрокрылом НАСА.

Переход к облачной кавитации приводит к возникновению интенсивных квазипериодических пульсаций длины паргазовой каверны и, вероятно, вследствие этого, распределения скорости становятся довольно схожими (рис. 10, з). Размеры каверн на обоих гидропрофилях также выглядят одинаковыми. Амплитуда турбулентных флуктуаций возрастает до $u/U_0=0,3$ на обоих крыльях ($0,4<x/C<0,7$), а в следе за ними ($x/C>1$) профили скорости практически совпадают (рис. 11, з).

Заключение

В работе с помощью высокоскоростной визуализации и измерений скорости методом PIV зарегистрированы основные особенности зарождения и развития кавитации, пространственной структуры и динамики кавитационных каверн, а также распределений турбулентных характеристик течений вблизи уменьшенной модели направляющих лопаток высоконапорной турбины при нескольких

углах атаки. Представлено прямое сравнение распределений средней и флуктуационной составляющих скорости над моделью НЛ и гидрокрылом НАСА0015 с одинаковой длиной хорды для различных кавитационных режимов (от однофазного течения до нестационарных режимов) при двух углах атаки 3° и 9° .

Структуры каверн на профиле НЛ и гидрокрыле НАСА0015 имеют ряд общих признаков, а также некоторые заметные отличия. При малых углах атаки зарождение кавитации происходит в форме перемещающихся пузырей на обоих гидрокрыльях, причем максимальные размеры пузырей очень близки. Конвективная скорость пузырей выше на НЛ вследствие особенностей формы ее профиля и, как следствие, более сильного локального ускорения потока. С уменьшением числа кавитации кавитационные пузыри растут, но при достижении некоторого критического значения числа кавитации размер пузырей начинает резко сокращаться. Вместе с тем существует критическое значение числа кавитации и для конвективной скорости пузырей, при пересечении которого скорость начинает уменьшаться с числом кавитации.

На модели НЛ обнаружен новый тип облачной кавитации. Этот нестационарный существенно трехмерный режим характеризуется периодическим несимметричным поочередным отрывом облаков то с одной, то с другой половины НЛ (по размаху). При этом задняя кромка каверны наклонена под углом $50-60^\circ$ к направлению течения. Число Струхала для данного нестационарного режима примерно в два раза больше, чем в случае обычной облачной кавитации. Следовательно, можно предполагать, что на данном режиме процесс осцилляций каверны является высшей гармоникой стандартных автоколебаний длины каверны при облачной кавитации. В натуральных условиях генерация дополнительного вида нестационарностей может, весьма вероятно, негативно сказываться на эффективности и сроке эксплуатации гидротехнического оборудования.

При малых углах атаки размер каверны для НЛ больше, чем для крыла НАСА0015. Однако в обоих случаях толщина пограничного слоя практически одинакова. Амплитуды флуктуаций скорости также имеют близкие значения в следе за гидропрофилями, но отличаются над их поверхностями, особенно в кавернах и за ними. При больших углах атаки для квазистойчивых режимов обтекания, включая режимы без кавитации и при ее зарождении, был обнаружен отрыв потока от поверхности НЛ в сечении $x/C=0,71$. Отрыв потока приводит к появлению второго максимума в распределениях флуктуаций скорости ниже по течению вдали от поверхности лопатки. Кроме того, амплитуда флуктуаций скорости значительно возрастает в области отрыва. Однако, когда происходит переход к нестационарным режимам, распределения скорости становятся подобными для обоих гидрокрыльев.

Основной вывод данной работы следующий: при малых углах атаки различия в распределениях средней и флуктуационной скорости для двух гидропрофилей незначительны. Однако на больших углах атаки при кавитационном обтекании НЛ может возникать новый тип нестационарностей на большей частоте, чем при облачной кавитации. Вместе с тем при квазиустойчивом обтекании НЛ на больших углах атаки отрыв потока от поверхности лопатки приводит к росту уровня флуктуаций скорости и генерации дополнительных возмущений, которые проявляются в виде второго максимума в распределениях флуктуационной составляющей скорости.

Следовательно, с точки зрения гидродинамики (не принимая во внимание силовые и прочностные характеристики обоих гидрокрыльев, а также турбины в целом) для регулирования расхода (нера-

счетные и неустановившиеся режимы эксплуатации) на докавитационных режимах обтекания и при зарождении кавитации распространенная форма симметричной направляющей лопатки менее предпочтительна по сравнению с гидрокрылом НАСА0015 вследствие порождения дополнительных возмущений на малых и больших углах атаки. Однако на развитых режимах кавитационного обтекания и для расчетных условий эксплуатации (за исключением случая, когда возникает новый тип неустойчивости с удвоенной частотой колебаний каверны) визуальное зарождение кавитации и распределения скорости достаточно схожи, а потому форма и толщина лопатки, судя по всему, не сильно влияют на динамику кавитации.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 14-29-00203) через Новосибирский государственный университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franc J.P., Michel J.M. Attached cavitation and the boundary layer: experimental investigation and numerical treatment // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1985. – Т. 154. – С. 63–90.
2. Le Q., Franc J.P., Michel J.M. Partial cavities: global behavior and mean pressure distribution // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 1993. – Т. 115. – № 2. – С. 243–248.
3. De Lange D.F., De Bruin G.J. Sheet cavitation and cloud cavitation, re-entrant jet and three-dimensionality // *Applied Scientific Research*. – 1998. – Т. 58. – С. 91–114.
4. Pham T.M., Larrarte F., Fruman D.H. Investigation of unsteady sheet cavitation and cloud cavitation mechanisms // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 1999. – Т. 121. – № 2. – С. 289–296.
5. Gu W., He Y., Hu T. Transcritical patterns of cavitating flow and trends of acoustic level // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2001. – Т. 123. – № 4. – С. 850–856.
6. Coutier-Delgosha O., Devillers J.-F., Pichon T. Internal structure and dynamics of sheet cavitation // *Physics of Fluids*. – 2006. – Т. 18. – № 1. – С. (017103)–12.
7. Foeth E.-J., Terwisga van T., Doorne van C. On the collapse structure of an attached cavity on a three-dimensional hydrofoil // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2008. – Т. 130. – № 7. – С. (071303)–9.
8. Experimental investigation of added mass effects on a hydrofoil under cavitation conditions / O. De La Torre, X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat // *Journal of Fluids and Structures*. – 2013. – Т. 39. – С. 173–187.
9. Numerical simulation of three dimensional cavitation shedding dynamics with special emphasis on cavitation-vortex interaction / B. Ji, X. Luo, R.E.A. Arndt, Y. Wu // *Ocean Engineering*. – 2014. – Т. 87. – С. 64–77.
10. Large eddy simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil / B. Ji, X.W. Luo, R.E.A. Arndt, X. Peng, Y. Wu // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2015. – Т. 68. – С. 121–134.
11. 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. – Т. 111. – № 2. – С. 204–210.
12. Velocity field measurements of cavitating flows / A.L. Tassin, C.-Y. Li, S.L. Ceccio, L.P. Bernal // *Experiments in Fluids*. – 1995. – Т. 20. – С. 125–130.
13. An experimental investigation of cavitation inception and development on a two-dimensional Eppler hydrofoil / J.-A. Astolfi, P. Dorange, J.-Y. Billard, T.I. Cid // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2000. – Т. 122. – № 1. – С. 164–173.
14. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. P. 1. Cavities forming on models without spanwise variation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – Т. 431. – С. 1–41.
15. 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. – Т. 135. – № 7. – С. (071301)–16.
16. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле НАСА0015: 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.
17. Li C.-Y., Ceccio S.L. Interaction of single travelling bubbles with the boundary layer and attached cavitation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1996. – Т. 322. – С. 329–353.
18. Franc J.-P., Michel J.-M. *Fundamentals of Cavitation*. – Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 322 с.
19. 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. – Т. 444. – С. 223–256.
20. High-speed imaging of cavitation regimes on a round-leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil / A.Yu. Kravtsova, D.M. Markovich, K.S. Pervunin, M.V. Timoshevskiy, K. Hanjalić // *Journal of Visualization*. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 181–184.

Поступила 10.03.2015 г.

UDC 532.528:532.574.7:532.582.32

FEATURES OF CAVITATION FLOW AROUND A SCALED-DOWN MODEL OF GUIDE VANES OF A FRANCIS TURBINE

Mikhail V. Timoshevskiy,

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: timoshevskiy.mv@gmail.com

Sergey A. Churkin,

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: c.a.churkin@gmail.com

Aleksandra Yu. Kravtsova,

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: Kravtsova.Alya@gmail.com

Konstantin S. Pervunin,

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: pervunin@itp.nsc.ru

Georgii A. Semenov,

OJSC «Silovye mashiny», 3A, Vatutin Str., Saint-Petersburg, 195009, Russia. E-mail: Semenov_GA@lmz.power-m.ru

Dmitriy M. Markovich,

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russia; Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: dmark@itp.nsc.ru

Kemal Hanjalić,

Novosibirsk State University, 2, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russia; Delft University of Technology, 136, Julianalaan, Delft, 2628 BL, the Netherlands. E-mail: khanjalic@gmail.com

Processes accompanying gas-vapor cavitation and nonstationarities of various origins are widely acknowledged to be the major causes of impairment of hydrotechnical equipment performance.

The main aim of the research is to study cavitation regimes and nonstationarities of gas-vapor cavities arising on the suction side of two symmetric generic bodies: a NACA0015 hydrofoil and a scaled-down model of guide vanes of a Francis turbine.

The methods used in the study. High-speed visualization was applied to investigate spatial structure and dynamics of gas-vapor cavities as well as to estimate the integral parameters of the attached and cloud cavities. Velocity fields and turbulent characteristics of single- and two-phase flows around the hydrofoils were measured by means of Particle Image Velocimetry (PIV).

The results. For small angles of incidence ($\alpha=3^\circ$), the maximum diameter of traveling bubbles reaches 12 mm on the guide vane model and 13 mm on the NACA0015 hydrofoil just prior to the bubble collapse. This difference is probably caused by various local pressure distributions on the suction sides of both foils. When the cavitation number decreases, the transient bubble size shrinks. The mean convection velocity of the traveling bubbles is somewhat higher over the guide vane section for the same cavitation numbers compared to that over the NACA foil. Increasing the attack angle up to $\alpha=9^\circ$ leads to modification of the attached cavity pattern on the guide vane model from traveling bubbles to streak cavitation like on the NACA0015 foil. When the cavitation number is reduced, the cloud cavitation caused by the development of an intrinsic instability – a re-entrant jet underneath the attached cavity due to an adverse pressure gradient – takes place. On the guide vane section, transition to unsteady regimes occurs faster (for lower change of the cavitation number) than for the NACA foil. A new kind of cloud-type instability, that is also characterized by quasi-periodic detachment of a sheet

cavity and subsequent shedding of a large cloud cavity, was discovered for the guide vane model. The main feature of this kind of cloud-type instability is that the process of cloud cavity shedding takes place within a half of the model between the guide vane centerline and the test channel sidewall but then it occurs on the other side of the test channel. Afterwards, this cycle wholly repeats. This process occurs at the doubled frequency of the conventional cloud cavitation and, thus, it is regarded as a higher harmonic of the cloud-type instability in the current research. In case of single-phase flow at $\alpha=9^\circ$ the transverse dimension of the turbulent wake past the guide vane section is about two times wider than that behind the NACA0015 hydrofoil. This is the result of the flow separation from the guide vane surface at the distance of approximately 71 % of the foil chord length from its leading edge. Moreover, the flow separation on the guide vane model leads to the growth of turbulent fluctuations in the wake and appearance of the second maximum in fluctuating velocity distributions over the guide vane section in comparison with the case of small angle of attack.

Key words:

Cavitation, attached/cloud cavities, system/intrinsic instabilities, guide vane, NACA0015 hydrofoil, high-speed imaging, Particle Image Velocimetry.

The research was supported by the Russian Scientific Foundation (grant no. 14–29–00203) in Novosibirsk State University.

REFERENCES

1. Franc J.P., Michel J.M. Attached cavitation and the boundary layer: experimental investigation and numerical treatment. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, vol. 154, pp. 63–90.
2. Le Q., Franc J.P., Michel J.M. Partial cavities: global behavior and mean pressure distribution. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1993, vol. 115, no. 2, pp. 243–248.
3. De Lange D.F., De Bruin G.J. Sheet cavitation and cloud cavitation, re-entrant jet and three-dimensionality. *Applied Scientific Research*, 1998, vol. 58, pp. 91–114.
4. Pham T.M., Larrarte F., Fruman D.H. Investigation of unsteady sheet cavitation and cloud cavitation mechanisms. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1999, vol. 121, no. 2, pp. 289–296.
5. Gu W., He Y., Hu T. Transcritical patterns of cavitating flow and trends of acoustic level. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 850–856.
6. Coutier-Delgosha O., Devillers J.-F., Pichon T. Internal structure and dynamics of sheet cavitation. *Physics of Fluids*, 2006, vol. 18, no. 1, pp. (017103)–12.
7. Foeth E.-J., Terwisga van T., Doorne van C. On the collapse structure of an attached cavity on a three-dimensional hydrofoil. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2008, vol. 130, no. 7, pp. (071303)–9.
8. De La Torre O., Escaler X., Egusquiza E., Farhat M. Experimental investigation of added mass effects on a hydrofoil under cavitation conditions. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, vol. 39, pp. 173–187.
9. Ji B., Luo X., Arndt R.E.A., Wu Y. Numerical simulation of three dimensional cavitation shedding dynamics with special emphasis on cavitation-vortex interaction. *Ocean Engineering*, 2014, vol. 87, pp. 64–77.
10. Ji B., Luo X.W., Arndt R.E.A., Peng X., Wu Y. Large eddy simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, vol. 68, pp. 121–134.
11. 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.
12. Tassin A.L., Li C.-Y., Ceccio S.L., Bernal L.P. Velocity field measurements of cavitating flows. *Experiments in Fluids*, 1995, vol. 20, pp. 125–130.
13. Astolfi J.-A., Dorange P., Billard J.-Y., Cid Tomas I. An experimental investigation of cavitation inception and development on a two-dimensional Eppler hydrofoil. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2000, vol. 122, no. 1, pp. 164–173.
14. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 431, pp. 1–41.
15. 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.
16. 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.
17. Li C.-Y., Ceccio S.L. Interaction of single travelling bubbles with the boundary layer and attached cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, vol. 322, pp. 329–353.
18. Franc J.-P., Michel J.-M. *Fundamentals of Cavitation*. Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2004. 322 p.
19. 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.
20. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskiy M.V., Hanjalić K. High-speed imaging of cavitation regimes on a round-leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil. *Journal of Visualization*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 181–184.

Received: 10 March 2015.

УДК 62-843.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

Обухов Сергей Геннадьевич,

д-р техн. наук, доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий
Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: serob99@mail.ru

Плотников Игорь Александрович,

канд. техн. наук, доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий
Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: igorplt@tpu.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности работы дизель-генераторных установок в составе автономных систем электроснабжения с целью снижения себестоимости электроэнергии.

Цель работы: экспериментальное доказательство эффективности перевода рабочего режима дизель-генераторной установки с постоянной частоты вращения на переменную и определение областей регулирования рабочими режимами установки.

Методы исследования: экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения двигателя на базе специально созданного лабораторного стенда.

Результаты. Показано, что перевод рабочих режимов дизель-генераторной установки на переменную частоту вращения, оптимизированную по удельному расходу топлива, обеспечивает следующие преимущества: уменьшение механических потерь и повышение коэффициента полезного действия дизельного двигателя и генератора на всех долевых нагрузочных режимах, кроме номинального; снижение удельного расхода топлива; улучшение экологических показателей; улучшение эргономических показателей путем снижения уровня шума и уменьшения вибрации. Теория подобия двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, а также аналогичные результаты по удельному расходу топлива, полученные другими исследователями, позволяют распространить полученные выводы и на другие дизель-генераторные установки, того же диапазона мощностей до 60 кВт, с двигателями без наддува. Получена универсальная функциональная зависимость частоты выходного напряжения генератора от величины электрической нагрузки электростанции, которая может быть использована при разработке и создании дизель-генераторных установок инверторного типа. Результаты проведенных экспериментов позволяют сформулировать основные технические требования к подсистемам управления инверторных дизель-генераторных установок, определить необходимые физические переменные, позволяющие осуществлять как контроль над состоянием объекта, так и управление им.

Ключевые слова:

Автономные системы электроснабжения, дизель-генераторные установки, дизельный двигатель, переменная скорость вращения.

Основу локальной энергетики России составляют дизельные электростанции (ДЭС), основным элементом которых являются дизель-генераторные

установки (ДГУ). Как источники электроэнергии автономных систем электроснабжения они обладают очевидными достоинствами и известными недостатками, главные из которых – большой расход органического топлива на выработку одного кВт·ч электроэнергии и загрязнение окружающей среды. К перспективному направлению повышения эффективности локальных систем электроснабжения относится использование возобновляемых источников энергии, однако они в большинстве случаев не обеспечивают требуемой надежности электроснабжения потребителей, то есть полноценной альтернативы ДГУ на сегодняшний день нет. Поэтому в последнее время все большее распространение получают гибридные энергетические системы, построенные на базе ДГУ и установок возобновляемой энергетики [1, 2].

Все общепромышленные ДГУ работают на постоянной частоте вращения при изменении в широком диапазоне их электрической нагрузки. Данный подход проверен многолетней практикой и позволяет использовать достаточно простые и надежные системы регулирования. Однако такая страте-

гия управления ДГУ имеет ряд серьезных недостатков: значительно возрастает удельный расход топлива в режимах частичных нагрузок, снижается эксплуатационный ресурс дизелей, возрастают выбросы вредных веществ [3].

Одним из наиболее перспективных технических решений повышения эффективности автономных систем электроснабжения является перевод рабочего режима ДГУ с постоянной частоты вращения на переменную, оптимизированную по величине электрической нагрузки. Актуальность такого подхода подтверждает и тот факт, что в последнее время в зарубежной [4–10] и отечественной [11] научной периодике появилось много публикаций на эту тему. Кроме того, разработкой станций такого типа занимаются такие известные компании, как Caterpillar, Cummins, Kipor и др.

При переводе ДГУ на переменную частоту вращения параметры выходного напряжения, вырабатываемого генератором, меняются. Для обеспечения заданных параметров выходного напряжения требуется введение в систему силовых преобразователей (управляемых выпрямителей и инверторов), что, с одной стороны, усложняет и удоро-

жает систему, но, с другой – наделяет ее рядом преимуществ: значительно снижается удельный расход топлива, улучшается качество генерируемой электроэнергии, обеспечивается разгрузка генератора от протекания реактивных токов и т. д.

Наличие вставки постоянного тока позволяет создавать универсальные энергетические комплексы с источниками энергии различной физической природы (например, возобновляемыми) и широкими возможностями эффективного управления их рабочими режимами [12–14]. Кроме того, часть потребителей (например, современная осветительная сеть на основе светодиодных источников) может быть запитана непосредственно постоянным током, что обеспечит повышение эффективности всей системы электроснабжения [15]. Такой подход хорош и с технологической точки зрения, так как позволяет использовать при построении ДГУ выпрямительно-инверторного типа модульную архитектуру, с возможностью унификации основных энергетических элементов таких установок на широкий диапазон мощностей.

Выпрямительно-инверторные ДГУ представляют собой сложную техническую систему, состоя-

щую из большого числа взаимосвязанных энергетических компонентов, многие из которых имеют нелинейные и стохастические характеристики, характеризуются большим разбросом постоянных времени, что значительно усложняет процессы их исследования и проектирования [16, 17].

Распространенным методом их изучения, позволяющим получить достоверные результаты, является прямой эксперимент. Конечная цель данных исследований состоит в разработке технических и технологических решений по созданию модельного ряда ДГУ выпрямительно-инверторного типа на ряд мощностей до 60 кВт. Задачи исследований, представленных в данной статье, заключались в экспериментальном доказательстве эффективности перевода рабочего режима ДГУ с постоянной частоты вращения на переменную и определении областей регулирования рабочими режимами установки.

В качестве объекта исследований выбрана дизельная электростанция KDE12EA3 компании Kipor [18], построенная на основе дизельного четырехтактного двигателя без наддува KM2V80, мощностью 12,0 кВт, и синхронного генератора с электро-

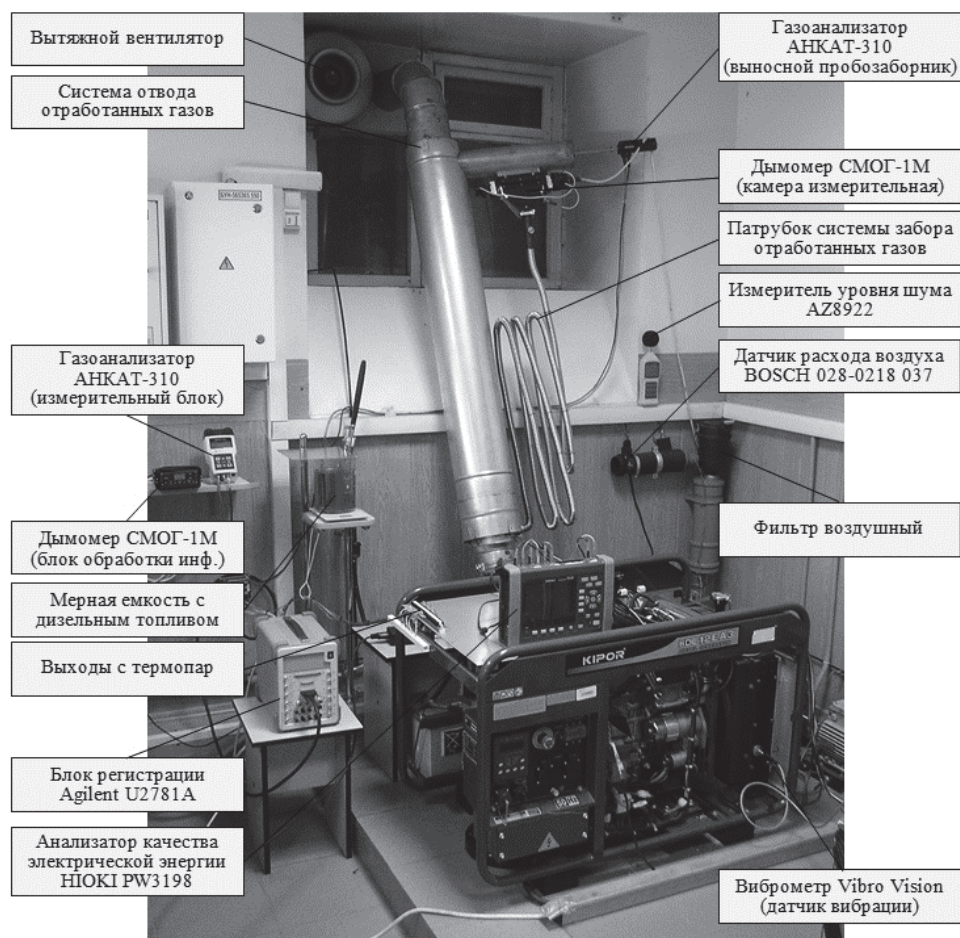


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Fig. 1. Appearance of the experimental unit

магнитным возбуждением KTS12. ДГУ KDE12EA3 предназначена для использования в качестве основного источника электропитания напряжением 230/400 В, частотой 50 Гц. Выбор данной модели электростанции обоснован тем, что она сертифицирована в России и обладает хорошим соотношением цена/качество.

Для проведения экспериментальных исследований в конструкцию ДГУ внесены следующие изменения: переделана система подачи топлива на насос высокого давления дизеля, установлена система позиционирования положения рейки топливного насоса, обеспечена возможность питания обмотки возбуждения генератора от независимого регулируемого источника. Для полного контроля эксплуатационных режимов ДГУ в системы ее жизнеобеспечения – подача топлива, охлаждение и газообмен – установлено необходимое инструментальное оборудование: датчики температуры во впускном коллекторе, охлаждающей жидкости и отработанных газов (ОГ), датчики расхода воздуха и охлаждающей жидкости, индукционный датчик частоты вращения и др.

Внешний вид экспериментальной установки с размещенными датчиками и контрольно-измерительными приборами представлен на рис. 1. Была разработана программа экспериментальных исследований, которая предусматривала снятие основных эксплуатационных характеристик ДГУ при работе в стандартном режиме ($n=\text{const}$), на переменной частоте вращения ($n=\text{var}$) и их последующий сравнительный анализ.

При проведении экспериментов по определению основных характеристик и параметров ДГУ в стандартном режиме работы регулировочный винт рейки топливного насоса был установлен в исходное положение, соответствующее заводским настройкам номинального режима. При проведении экспериментов по определению характеристик ДГУ, работающей на переменной частоте вращения, цепь возбуждения синхронного генератора питалась от независимого регулируемого источника питания, рейка топливного насоса для каждого опыта выставлялась в новое положение. Значения выходного фазного напряжения генератора в проводимых экспериментах поддерживалось в пределах 220–230 В при условии, что величина тока возбуждения не превышает предельно допустимого значения для данного типа генератора – 3,0 А.

Для характеристики положения регулировочного винта рейки приняты следующие обозначения: h_0 – рейка топливного насоса находится в исходном положении (заводская установка); h_4 – рейка топливного насоса смещена на 4 мм от исходного положения в сторону уменьшения цикловой подачи топлива.

Эксплуатационные показатели ДГУ в стандартном режиме работы оценивались по нагрузочным характеристикам. Проведенные эксперименты показали, что при изменении нагрузки ДГУ в пределах от холостого хода до номинального значения

частота выходного напряжения изменяется от 53,0 до 49,9 Гц. Всережимный регулятор частоты вращения обеспечивает регулирование подачи топлива G_m в зависимости от величины нагрузки практически по линейному закону. При этом зависимость удельного расхода топлива g от величины нагрузки имеет нелинейный характер. Во всем диапазоне изменения электрической нагрузки стандартная система регулирования напряжения ДГУ обеспечивает стабилизацию величины выходного напряжения в пределах 230 ± 5 В, ток обмотки возбуждения изменяется от 0,85 до 2,45 А. Температура блока цилиндров двигателя не превышает 95 °С, режим работы дизеля устойчивый, вибрация не превышает допустимых пределов.

Механические потери в дизельном двигателе определены методом холодной прокрутки и составили для номинального режима $P_m=5,47$ кВт, механический КПД $\eta_m=68\%$. Тепловой баланс дизеля в режиме номинальной нагрузки показан на рис. 2. Эффективный КПД преобразования энергии дизельного двигателя при номинальной нагрузке составил $\eta_e=30,6\%$.

Показатели качества генерируемой электрической энергии оценивались по ГОСТ Р 54149–2010. Проведенные эксперименты показали, что форма кривой выходного напряжения генератора ДГУ отличается от синусоидальной, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U составляет 35,4%. Качество электрической энергии по длительности провалов напряжения определялось по переходным процессам запуска от ДГУ асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором типа АИР90L4У3 и АД71В4У3.

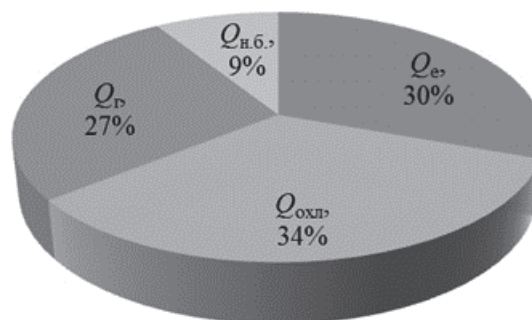


Рис. 2. Тепловой баланс дизельного двигателя KM2V80 в номинальном рабочем режиме: Q_e – количество теплоты, эквивалентное эффективной работе; Q_g – количество теплоты, уносимое с отработанными газами; $Q_{охл}$ – количество теплоты, отводимое системой охлаждения; $Q_{н.б.}$ – невязка теплового баланса

Fig. 2. Thermal balance of diesel engine KM2V80 in nominal operating mode: Q_e is the heat amount, equivalent to the efficient operation; Q_g is the heat amount, removed with the exhaust gases; $Q_{охл}$ is the heat amount, removed by a cooling system; $Q_{н.б.}$ is the thermal balance error

Абсолютные значения выбросов в атмосферу вредных веществ оценивались по объемным долям в отработанных газах окислов азота ϕ_{NOx} и окиси углерода ϕ_{CO} (млн⁻¹), а также концентрации угле-

кислого газа C_{CO_2} (%). Предельно допустимые нормы выброса вредных веществ и допустимые параметры дымности отработанных газов для исследуемого дизеля определены по ГОСТ Р 51249–99 и ГОСТ Р 51250–99. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что натуральный показатель ослабления светового потока K , характеризующий дымность отработанных газов дизеля, соответствует требованиям нормативных документов во всем диапазоне возможных рабочих режимов двигателя. Удельные выбросы окислов азота e_{NO_x} и окиси углерода e_{CO} превышают допустимые нормы только в режиме холостого хода и малых нагрузок дизеля, и в целом удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51249–99.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Основные технические характеристики ДГУ Kiror KDE12EA3 в целом удовлетворяют требованиям нормативных

документов к автономным источникам питания, построенных на базе двигателей внутреннего сгорания. Однако параметры качества выходного напряжения ДГУ по ряду показателей не соответствуют требованиям нормативов. Результаты анализа характеристик ДГУ KDE12EA3 при работе в стандартных эксплуатационных режимах приведены в таблице.

На рис. 3 представлено семейство регуляторных характеристик ДГУ KDE12EA3, снятых при различных положениях управляющего органа подачи топлива h . Здесь также нанесена линия максимальных мощностей частичных скоростных режимов – 1, определяющая предельно допустимые значения коэффициента ослабления светового потока $K_{доп}$, полученная по результатам проведенных экспериментов. Для обеспечения наиболее экономичных режимов работы дизеля в процессе эксплуатации полученная линейная зависимость должна быть смеще-

Таблица. Результаты анализа эксплуатационных характеристик ДГУ KDE12EA3 при работе в стандартном режиме

Table. Results of the analysis of diesel generator set (DGS) KDE12EA3 performance in standard mode

№	Нормируемый показатель Specified parameter	ДГУ KDE12EA3 DGS KDE12EA3	Нормативный документ, требования Regulatory document, requirements	Примечание Note
	Показатели качества электрической энергии Electric energy quality indices		ГОСТ Р 54149–2010	
1	Установившееся отклонение напряжения Steady-state voltage deviation	не более $\pm 2,2$ % от номинального значения not more than $\pm 2,2$ % of nominal value	не более ± 5 % от номинального значения not more than ± 5 % of nominal value	удовлетворяет требованиям meets the requirements
2	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения Voltage waveform distortion factor	35,4 %	не более 8,0 % not more than 8,0 %	не удовлетворяет требованиям does not meet the requirements
3	Нормально допустимые значения коэффициента n -й гармонической составляющей Normal permitted values of n harmonic component coefficient Номер гармонической составляющей: Number of a harmonic component: 3 5 7 9 11	35,27 1,01 1,41 2,16 0,9	5,0 6,0 5,0 1,5 3,5	не удовлетворяет требованиям does not meet the requirements
4	Отклонение частоты Frequency deviation	$-0,1 + 3,0$ Гц (Hz)	$\pm 0,2$ Гц (Hz)	не удовлетворяет требованиям does not meet the requirements
5	Предельно допустимое значение длительности провала напряжения Overload capacity of voltage fall duration	0,16 с (s)	30 с (s)	удовлетворяет требованиям meets the requirements
	Выбросы вредных веществ с отработанными газами Emissions release with exhaust gases		ГОСТ Р 51249–99	
1	Удельный выброс окислов азота NOX emission	до 28,5 е/кВт·ч в режиме холостого хода up to 28,5 e/kW·h in idle mode	не более 11,0 е/кВт·ч not more than 11,0 e/kW·h	удовлетворяет требованиям meets the requirements
2	Удельный выброс окиси углерода CO emission	до 48,0 е/кВт·ч в режиме холостого хода up to 48,0 e/kW·h in idle mode	не более 10,0 е/кВт·ч not more than 10,0 e/kW·h	удовлетворяет требованиям meets the requirements
	Дымность отработанных газов Smokiness of the exhaust gases		ГОСТ Р 51250–99	
1	Натуральный показатель ослабления светового потока Natural value of luminous flux declension	не более $1,76 \text{ м}^{-1}$ not more than $1,76 \text{ м}^{-1}$	не более $1,84 \text{ м}^{-1}$ not more than $1,84 \text{ м}^{-1}$	удовлетворяет требованиям meets the requirements

на вниз до заводской установки режима номинальной мощности: $h_{0-P_n}=9,5$ кВт (линия 2).

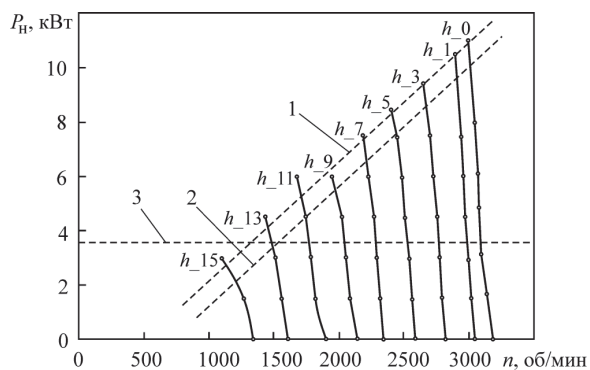


Рис. 3. Регуляторные характеристики ДГУ KDE12EA3

Fig. 3. Regulatory characteristics of DGS KDE12EA3

Для обеспечения устойчивой работы дизеля в области малых нагрузок следует ограничить его минимальную рабочую частоту вращения на уровне 1600 об/мин, что соответствует смещению топливной рейки на 12 мм от заводской установки (линия 3). Дальнейшее снижение частоты вращения нецелесообразно, так как при низких частотах значительно увеличивается неравномерность процессов распыления и сгорания топлива, что приводит к неустойчивым режимам работы двигателя.

Результаты проведенных экспериментов определяют диапазон перемещения рейки топливного насоса ДГУ KDE12EA3, необходимый для реализации режима управления электростанцией по критерию минимума расхода топлива, который составляет 12 мм от h_0 в режиме номинальной мощности до h_{12} в режиме малых нагрузок, при рабочем диапазоне частот вращения от 3000 до 1600 об/мин (рис. 3). В результате получена функциональная зависимость, связывающая положение рейки топливного насоса с мощностью электрической нагрузки ДГУ, при которой удельный расход топлива будет минимальным, рис. 4.

На рис. 4 также показана зависимость частоты выходного напряжения f от величины электрической нагрузки ДГУ, рабочие режимы которой оптимизированы по удельному расходу топлива. Зависимость также является линейной, что позволяет использовать текущие значения частоты вращения в качестве сигнала обратной связи в системе автоматического регулирования управляющим органом подачи топлива в ДГУ инверторного типа.

Экспериментальные зависимости удельного расхода топлива исследуемой ДГУ, работающей в стандартном режиме ($n=const$), и оптимизированной по расходу ($n=var$), представлены на рис. 5. Из него видно, что перевод ДГУ на переменную частоту вращения обеспечивает экономию топлива во всем диапазоне рабочих режимов, при этом максимальная экономия достигается в режимах малых нагрузок.

Уменьшение удельного расхода топлива в ДГУ с переменной частотой вращения обеспечивается

за счет снижения механических потерь в дизельном двигателе, повышения КПД генератора η_r и эффективного КПД дизеля η_e .

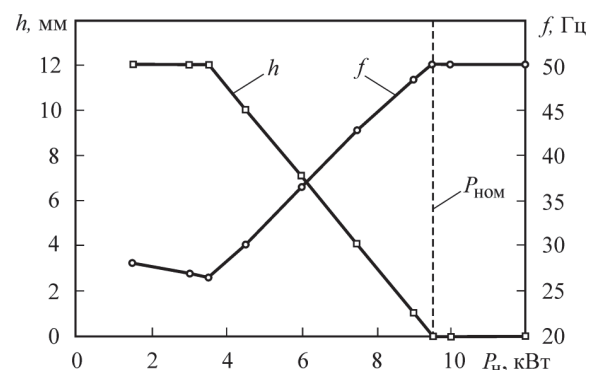


Рис. 4. Функциональная зависимость положения рейки топливного насоса от электрической нагрузки ДГУ KDE12EA3, обеспечивающая минимальный расход топлива

Fig. 4. Functional dependence of control rack position on electric load of DGS KDE12EA3 providing minimum fuel

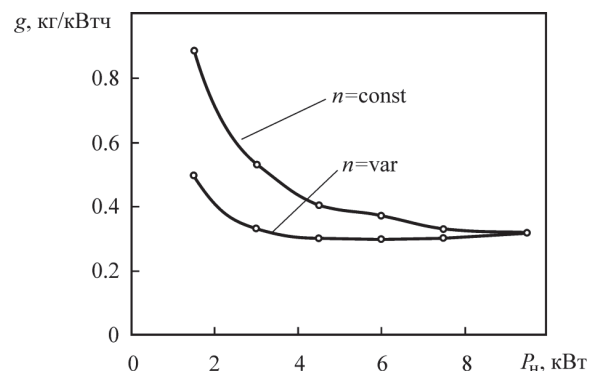


Рис. 5. Зависимость удельного расхода топлива от величины электрической нагрузки в ДГУ на постоянной и переменной частотах вращения

Fig. 5. Dependence of specific fuel consumption on electric load value in DGS on constant and variable speed

На рис. 6 представлены сравнительные энергетические характеристики ДГУ, построенные по результатам проведенных экспериментов. Повышение эффективного КПД дизеля η_e в ДГУ с переменной частотой вращения обеспечивается лучшим качеством горючей смеси на долевых нагрузочных режимах. Качество смесеобразования во многом определяет коэффициент избытка воздуха α , величина которого в современных дизелях колеблется в пределах от 1,2 до 1,8 (зависит от типа камеры сгорания и наддува). Как правило, производители обеспечивают оптимальные значения α на долевых режимах, составляющих около 80 % от номинальной мощности дизеля. В большинстве ДГУ мощностью до 60 кВт используется дизельный двигатель без системы наддува. Соответственно, в ДГУ с постоянной частотой вращения расход воздуха остается практически неизменным на всех долевых режимах нагрузки, а стабилизация рабочего режима дизеля обеспечивается изменением

только цикловой подачи топлива, обратно пропорционально которой изменяется величина α . В ДГУ с переменной частотой вращения при уменьшении величины нагрузки вместе с изменением цикловой подачи уменьшается и частота вращения, а соответственно и расход воздуха, благодаря чему значения α на долевых режимах будут несколько меньшими. В исследуемом дизеле применена разделенная камера сгорания с вихревой камерой, и наилучшие условия смесеобразования обеспечиваются при значениях $\alpha \approx 1,4$. При работе ДГУ с переменной частотой вращения значения α для большинства частичных режимов нагрузки будут ближе к оптимальным, в сравнении с общепромышленной установкой.

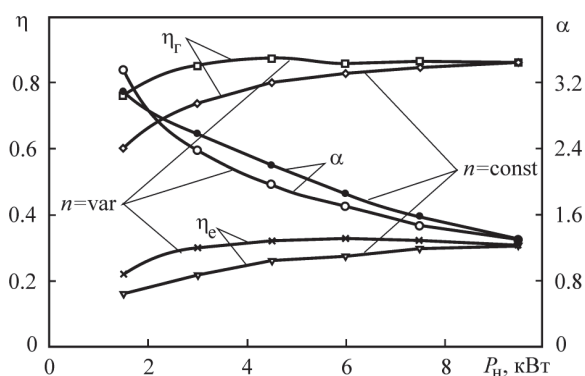


Рис. 6. Сравнительные энергетические характеристики ДГУ с постоянной и переменной частотой вращения

Fig. 6. Comparative energy characteristics of DGS with constant and variable speed

Повышение КПД преобразования энергии в электрической машине при эксплуатации на пониженных частотах вращения объясняется кардинальным изменением структуры потерь: уменьшаются потери в стали и механические потери, но при этом увеличиваются потери в обмотке возбуждения и цепи якоря (влияние дополнительных потерь на общий баланс незначительно). Анализ потерь в синхронном генераторе, работающем на переменной частоте вращения, рассмотрен ранее в [19, 20].

Эргономические показатели ДГУ оценивались по ГОСТ Р ИСО 8528–10–1993 и ГОСТ Р ИСО 8528–9–1993.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что перевод рабочих режимов ДГУ на переменную частоту вращения, оптимизированную по удельному расходу топлива,

обеспечивает следующие конкурентные преимущества:

- уменьшение механических потерь и повышение КПД дизельного двигателя и генератора на всех долевых режимах нагрузки, кроме номинальной;
- снижение удельного расхода топлива на всех долевых режимах с экономией в режимах малых нагрузок до 40 % от базового варианта;
- улучшение экологических показателей: уменьшение удельных выбросов окислов азота до 20 %, окиси углерода – до 25 %, концентрации углекислого газа – до 10 %;
- улучшение эргономических показателей: снижение уровня шума на 10 дБ, уменьшение вибрации до 40 %.

Исследования проводились на базе одной конкретной модели дизель-генераторной установки, однако теория подобия двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, а также аналогичные результаты по удельному расходу топлива, полученные другими исследователями [6], позволяют распространить полученные выводы и на другие ДГУ, того же диапазона мощностей до 60 кВт, с двигателями без наддува. При этом для регулирования цикловой подачи топлива ДГУ можно использовать универсальную функциональную зависимость частоты выходного напряжения f от величины электрической нагрузки электростанции P_n , представленную в относительных единицах (рис. 4).

Для практической реализации решений по созданию ДГУ инверторного типа необходима разработка специализированной системы управления, включающей подсистемы управления топливоподачей, регулирования тока возбуждения генератора и преобразования параметров выходного напряжения. Результаты проведенных экспериментов позволяют сформулировать основные технические требования к подсистемам управления инверторных ДГУ, определить необходимые физические переменные, позволяющие осуществлять как контроль над состоянием объекта, так и управление им.

Выполненный анализ проектов перевода действующих дизельных электростанций Республики Саха (Якутия) с постоянной на переменную частоту вращения показал, что они являются рентабельными, при сроке окупаемости от 3 до 5 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rezkallah M., Chandra A., Singh B. Three-Leg Four-Wire Voltage Source Inverters for Hybrid Standalone System feeding Unbalanced Load // Industrial Electronics Society, IECON 2013: 39th Annual Conference of the IEEE. – Vienna, Austria, 2013. – P. 1916–1921.
2. Goyal M., Gupta R. Operation and Control of a Distributed Microgrid with Hybrid System // Power Electronics (ICPE): 2012 IEEE 5th India International Conference. – Delhi, India, 2012. – P. 1–6.
3. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа / С.Г. Обухов, Б.В. Лукутин, Г.Н. Климова, Е.А. Шутов, Н.М. Парников // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С.80–82.
4. Wang D.H., Nayar C.V., Wang C. Modeling of Stand-alone Variable Speed Diesel Generator using Doubly-Fed Induction Generator // 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. – HeFei, China, 2010. – P. 1–6.
5. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Gen-

- erator-Converter Set // IEEEJ Transaction on Industry Applications. – 2007, November. – V. 127. – № 10. – P. 1064–1069.
6. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine / J. Leuchter, V. Rerucha, Z. Krupka, P. Bauer // The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007). – Orlando: PESC Press, 2007. – P. 2287–2293.
 7. Leuchter J., Bauer P., Kurka O. Configuration for Mobile Electrical Power Source // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004). – Nuremberg: PCIM Press, 2004. – V. 1. – P. 916–919.
 8. A Bi-Directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements / L.M. Tolbert, W.A. Peterson, C.P. White, T.J. Theiss, M.B. Scudiere // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – Pittsburgh, 13–17 October, 2002. URL: http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002_bidi.pdf (дата обращения: 01.12.2014).
 9. Lee J.-H., Lee S.-H., Sul S.-K. Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2009. – V. 45. – № 6. – P. 2130–2135.
 10. Koczara W. Variable-Adjustable Speed Electricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES // Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference EVER. – Monaco, 26–29 March, 2009. URL: http://www.researchgate.net/publication/228899464_Variable-Adjustable_Speed_Electricity_Generation_as_Emerging_Technology_of_Power_Systems_and_Application_to_RES (дата обращения: 01.12.2014).
 11. Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Система управления автономным дизель-генератором переменной частоты вращения // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2013. – № 5 (102). – С. 303–308.
 12. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Hibrid UPS Based on Supercapacitor Energy Storage and Adjustable Speed Generator // Journal Electrical Power Quality and Utilisation. – 2008. – V. XIV. – № 1. – P. 13–24.
 13. A Fuzzy Self-tuning PID Control System of Adjustable Speed Diesel Generator / Y. Zhang, S. Li, G. Lu, Y. Zhou // International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012). – Yantai, China, 2012. – P. 619–622.
 14. Optimal Control of Uninterruptible Power System with Diesel Generator / E. Pichkalov, A. Kiselova, O. Kiselova, G. Kiselov // IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kiev, Ukraine, 2013. – P. 378–380.
 15. Zahedi B., Norum L.E. Modeling and Simulation of All-Electric Ships with Low-Voltage DC Hybrid Power Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – V. 28. – № 10. – P. 4525–4537.
 16. Имитационная модель дизель-генераторной электростанции переменной скорости вращения с интеллектуальной системой управления топливopодачей / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.А. Тарпанов, В.В. Пшеничников // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2011. – № 1 (86). – С. 185–192.
 17. Дураев Н.Н., Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель дизельного двигателя для исследования его рабочих характеристик на переменной частоте вращения // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 48–52.
 18. Сайт компании Kipor. URL: <http://www.kipor.com/> (дата обращения: 01.12.2014).
 19. Математическая модель синхронного генератора инверторной дизельной электростанции / С.Г. Обухов, Н.Ю. Сипайлова, И.А. Плотников, А.Г. Сипайлов // Известия вузов: Проблемы энергетики. – 2012. – № 9–10. – С. 112–120.
 20. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции / С.Г. Обухов, Н.Ю. Сипайлова, И.А. Плотников, А.Г. Сипайлов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 41–45.

UDC 62–843.6

Поступила 05.02.2015 г.

THE EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DIESEL GENERATOR SET ON VARIABLE SPEED

Sergey G. Obukhov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: serob99@mail.ru

Igor A. Plotnikov,

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

Relevance of the research is determined by the need to improve the efficiency of diesel generator sets in the autonomous power supply systems to reduce the cost of electricity.

The aim of the research is to prove experimentally the effectiveness of changing the operating modes of a diesel generator set from constant speed to variable speed and identify the mode panel.

Research methods: experimental studies of a variable speed diesel generator set on the basis of a specially designed laboratory bench.

Results. The authors proved that the change of operating modes of the diesel generator set to the variable mode with a fuel consumption, optimized by fuel rate, provides the following advantages: reduces mechanical losses and increases the efficiency of a diesel engine and generator for all load conditions, other than nominal; reduces fuel consumption; improves environmental measures and ergonomic characteristics by reducing noise and vibration. The similarity theory of internal combustion engines and electric drives, and similar results for specific fuel consumption obtained by other researchers, allow us to extend our conclusions to other diesel generator sets, naturally aspirated engines with the same range of capacities up to 60 kW. The authors obtained the universal functional dependence of the output voltage frequency of the generator set on the magnitude of power plant electrical load, which can be used in the design and creation of inverter type diesel generator sets. The experimental results allow stating the basic technical requirements for inverter control subsystem of diesel generator sets, determining the required physical variables which allow controlling the state of the object.

Key words:

Stand-alone power supply system, diesel generator set, diesel engine, adjustable speed drive.

REFERENCES

1. Rezkallah M., Chandra A., Singh B. Three-Leg Four-Wire Voltage Source Inverters for Hybrid Standalone System feeding Unbalanced Load. *Industrial Electronics Society, IECON 2013: 39th Annual Conference of the IEEE*. Vienna, Austria, 2013. pp. 1916–1921.
2. Goyal M., Gupta R. Operation and Control of a Distributed Microgrid with Hybrid System. *Power Electronics (IICPE): 2012 IEEE 5th India International Conference*. Delhi, India, 2012. pp. 1–6.
3. Obukhov S.G., Lukutin B.V., Klimova G.N., Shutov E.A., Parnikov N.M. Formirovanie energoeffektivnykh rezhimov dizelnoy elektrostantsii invertornogo tipa [The formation of energy-efficient modes of diesel power inverter]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*, 2009, no. 6, pp. 80–82.
4. Wang D.H., Nayar C.V., Wang C. Modeling of Stand-alone Variable Speed Diesel Generator using Doubly-Fed Induction Generator. *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. HeFei, China, 2010. pp. 1–6.
5. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Generator-Converter Set. *IEEJ Transaction on Industry Applications*, 2007, November, vol. 127, no. 10, pp. 1064–1069.
6. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine. *The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando, PESC Press, 2007. pp. 2287–2293.
7. Leuchter J., Bauer P., Kurka O. Configuration for Mobile Electrical Power Source. *The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004)*. Nuremberg, PCIM Press, 2004. Vol. 1, pp. 916–919.
8. Tolbert L.M., Peterson W.A., White C.P., Theiss T.J., Scudiere M.B. A Bi-Directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Pittsburgh, 13–17 October, 2002. Available at: http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002_bidi.pdf (accessed 1 December 2014).
9. Lee J.-H., Lee S.-H., Sul S.-K. Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 2130–2135.
10. Koczara W. Variable-Adjustable Speed Electricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES. *Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference EVER*. Monaco, 26–29 March, 2009. Available at: http://www.researchgate.net/publication/228899464_Variable-Adjustable_Speed_Electricity_Generation_as_Emerging_Technology_of_Power_Systems_and_Application_to_RES (accessed 1 December 2014).
11. Darenkov A.B., Khvatov O.S. Sistema upravleniya avtonomnym dizel-generatorom peremennoy chastoty vrashcheniya [Autonomous control system of diesel generator to variable speed]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 5 (102), pp. 303–308.
12. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Hibrid UPS Based on Supercapacitor Energy Storage and Adjustable Speed Generator. *Journal Electrical Power Quality and Utilisation*, 2008, vol. XIV, no. 1, pp. 13–24.
13. Zhang Y., Li S., Lu G., Zhou Y. A Fuzzy Self-tuning PID Control System of Adjustable Speed Diesel Generator. *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012)*. Yantai, China, 2012. pp. 619–622.
14. Pichkalov E., Kiselova A., Kiselova O., Kiselov G. Optimal Control of Uninterruptible Power System with Diesel Generator. *IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, Ukraine, 2013. pp. 378–380.
15. Zahedi B., Norum L.E. Modeling and Simulation of All-Electric Ships With Low-Voltage DC Hybrid Power Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 10, pp. 4525–4537.
16. Khvatov O.S., Darenkov A.B., Tarpanov I.A., Pshenichnikov V.V. Imitatsionnaya model dizel-generatornoy elektrostantsii peremennoy skorosti vrashcheniya s intellektualnoy sistemoy upravleniya toplivopodachey [Simulation model of diesel generator of power plant with variable speed with intelligent throttle control]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2011, no. 1 (86), pp. 185–192.
17. Duraev N.N., Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Imitatsionnaya model dizelnogo dvigatelya dlya issledovaniya ego rabochikh kharakteristik na peremennoy chastote vrashcheniya [Simulation model of the diesel engine to investigate its performance on variable speed]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 48–52.
18. Kipor company. Available at: <http://www.kipor.com/> (accessed 1 December 2014).
19. Obukhov S.G., Sipaylova N.Yu., Plotnikov I.A., Sipaylov A.G. Matematicheskaya model sinkhronnogo generatora invertornoy dizelnoy elektrostantsii [Mathematical model of synchronous generator for diesel power inverter]. *Proceedings of the universities. Challenges of Energy*, 2012, no. 9–10, pp. 112–120.
20. Obukhov S.G., Sipaylova N.Yu., Plotnikov I.A., Sipaylov A.G. Kharakteristiki sinkhronnogo generatora, rabotayushchego v sostave invertornoy dizelnoy elektrostantsii [Characteristics of synchronous generator running in the diesel power inverter]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*, 2012, no. 5, pp. 41–45.

Received: 05 February 2015.

УДК 681.5.015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО КРИВОЙ РАЗГОНА МЕТОДОМ СИМОЮ

Стезьмащук Сергей Валерьевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации
промышленных установок электротехнического факультета
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета,
Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.
E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания систем с автоматической настройкой регуляторов для систем управления электроприводами с изменяющимся моментом инерции в широком диапазоне.

Цель работы: вывод методики определения момента инерции привода на основе обработки данных кривой разгона скорости привода методом Симою. Обязательным условием является реализация методики вычислительными средствами на базе контроллерных систем управления.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на методах классической теории автоматического управления и теории электропривода. Практические исследования подтверждены модельным экспериментом с применением программной среды MatLAB.

Результаты. Разработана методика, позволяющая вычислительными средствами в автоматическом режиме на основе данных кривой разгона привода определять момент инерции привода. Обосновано использование данной методики в самонастраивающихся системах с коррекцией параметров регуляторов привода. Проведены исследования условий реализации методики, и выявлено, что в качестве кривой разгона эффективнее использовать пусковую характеристику на холостом ходе привода. Выведено допустимое значение управляющего воздействия, при котором ток якоря не превышает максимального значения. Для подтверждения разработанной методики проведено имитационное моделирование элементами пакета SimPowerSystems в среде MatLAB. Показано, что рассмотренная методика предпочтительна для электроприводов постоянного тока с жёсткими связями в рабочем органе привода, что является ограничением в использовании метода Симою.

Выводы. Разработанная методика определения момента инерции электропривода на основе метода площадей Симою позволяет реализовать алгоритм идентификации момента инерции в автоматическом режиме. Это повысит уровень автоматизации технологических комплексов за счёт внедрения систем с автоматической настройкой, где реализован данный алгоритм идентификации.

Ключевые слова:

Станочный электропривод, определение момента инерции, метод Симою, автоматическая настройка регулятора.

Введение

Все классические методы определения момента инерции [1], такие как метод маятниковых колебаний раскачивания ротора, метод падающего груза и метод свободного выбега, являются методами стендовых испытаний и не могут быть реализованы в режиме нормальной эксплуатации работы привода. Для повышения уровня автоматизации работы технических систем требуется разработка самонастраивающихся систем управления электроприводами, работающими в режиме нормальной эксплуатации.

Важным вопросом самонастраивающихся систем управления является определение параметров электропривода, которые делятся на параметры электрического двигателя и параметры рабочего органа электропривода. Информация о параметрах двигателя доступна на шильдиках, которые в последнее время представляются в виде чипов (электронный шильдик), встроенных в корпус двигателя (например, интерфейс DRIVE-CLIQ фирмы Siemens), «что делает совершенным коммуникацию между моторами и системами приводов» [2]. Параметром, которым обладает рабочий орган и который зависит от ситуации использования, и поэтому может быть определён только в динамиче-

ском режиме, является суммарный момент инерции электропривода.

Вопросу параметрической идентификации объекта управления, где определяется момент инерции, посвящено много работ. Разработанные методы параметрической идентификации [3], как правило, реализуются в адаптивных системах с идентификатором [4], где в качестве модели используется передаточная функция, полученная на основе временной или частотной характеристики, определённой экспериментально. Одной из таких работ является статья [5], в которой «приведена методика определения момента инерции в замкнутом электроприводе с привлечением вещественного интерполяционного метода». В соответствии с данным методом, определение момента инерции осуществляется на основе обработки численными методами данных временной характеристики на выходе следящей системы. Рассматриваемая в данной статье методика может быть реализована в адаптивной системе с прямым управлением. Другим примером адаптивной системы с прямым управлением, но на основе определения частотной характеристики объекта управления, является автоматическое устройство для «идентификации многоходовых линейных объектов автоматизации в режиме нормальной эксплуатации» [6].

Большое значение имеют адаптивные системы с косвенным управлением, где точность идентификации объекта выше, чем в системах с прямым управлением. Здесь важную роль играют методы настройки регуляторов по кривой разгона объекта. От точности метода идентификации и сложности математического описания модели объекта управления зависит качество настройки регулятора. Недостатком адаптивных систем с косвенным управлением является сложность процедур настройки регулятора. В этом случае актуальным вопросом является повышение уровня автоматизации процедуры настройки. Проблемы автоматической настройки регулятора при косвенном управлении наиболее часто решаются формульными методами настройки, такими как метод Зиглера–Никольса или Чина–Хронеса–Ресвика и др., хорошо описанными как в отечественной [7, 8], так и в иностранной литературе [9–13]. Основной проблемой формульных методов является соотношение адекватности модели и применимости к методам синтеза по прямым показателям качества [14–17].

Из-за значительных изменений момента инерции механизма динамические характеристики привода будут сильно отличаться от настроечных характеристик, что приведёт к ухудшению качества производства и снижению производительности оборудования. В связи с этим актуальным являются способы автонастройки приводов после каждого изменения момента инерции механизма. Для реализации таких способов в статье исследуется вопрос применения метода Симою для идентификации суммарного момента инерции электропривода по кривой разгона скорости двигателя. Использование метода Симою позволит реализовать процедуру автоматической настройки регулятора в адаптивной системе с косвенным управлением.

Постановка задачи

Регулируемый электропривод на базе двигателя постоянного тока (ДПТ) с реверсивным тиристорным преобразователем, работающий на холостом ходе, можно представить как объект управления с передаточной функцией по сигналу управления U_y [18]:

$$W_{OY}(p) = \frac{\omega(p)}{U_y(p)} = \frac{K_{OY}}{(T_{II}p + 1)(T_{\Sigma}T_M p^2 + T_M p + 1)}, \quad (1)$$

где K_{OY} – коэффициент усиления объекта управления; T_{II} – постоянная времени преобразователя; T_{Σ} , T_M – электромагнитная и электромеханическая постоянные времени привода.

Параметр T_M определяется суммарным моментом инерции J_{Σ} и жёсткостью механических характеристик привода β :

$$T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}. \quad (2)$$

Суммарный момент инерции J_{Σ} является неизвестным параметром из-за неопределённости момента инерции механизма. У большинства промыш-

ленных механизмов изменение момента инерции возникает после приложения нагрузки, при этом возникает статический момент на валу двигателя, что не соответствует передаточной функции привода (1).

Изменение момента инерции привода в режиме холостого хода возможно для ограниченного круга приводов. Примером являются станочные механизмы для метало- или деревообработки. Изменение момента инерции осуществляется в тех станочных механизмах, где крепится обрабатываемая деталь. Например, у токарного станка деталь крепится к механизму главного движения, а у фрезерного – на столе механизма подачи. Массогабаритные показатели обрабатываемой детали определяют момент инерции привода и влияют на динамические показатели качества привода станка. Статический момент на валу двигателя в таких приводах без нагрузки (вне режима резания) обуславливается только силами трения механизма, которые составляют не более 10 % от номинальной нагрузки.

Существенное изменение момента инерции привода может привести к неудовлетворению требований по динамическим перепадам скорости станочных механизмов. Особенно эта проблема актуальна для приводов с малым передаточным числом редуктора или для безредукторных приводов.

Рассмотрим задачу определения суммарного момента инерции привода J_{Σ} по экспериментально снятой кривой разгона скорости вращения двигателя $\omega(t)$ с использованием метода Симою. Выявим наиболее благоприятные условия проведения эксперимента для минимизации ошибки определения момента инерции и влияние на точность определения момента инерции под воздействием сил трения в механизме.

Метод площадей Симою

Для решения поставленной задачи используется метод площадей Симою [19], который позволяет по кривой разгона аналитически определить коэффициенты передаточной функции модели объекта:

$$W_M(p) = K_M \frac{1 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n} e^{-\tau p},$$

где K_M – коэффициент усиления модели; a_i , b_i – коэффициенты передаточной функции модели; τ – время запаздывания.

Представленная модель соответствует объекту с самовыравниванием, что характерно для систем регулирования скорости, рассматриваемых в работе. Для настройки следящей системы, где выходной координатой является угол поворота вала привода, методом Симою привод должен рассматриваться как объект без самовыравнивания, что требует некоторых преобразований кривой разгона. В любом случае определение коэффициентов a_i и b_i осуществляется по алгоритму:

1. На вход преобразователя привода задаётся скачкообразный сигнал управления $U_y(t)$ вели-

чиной $U_{у.зад}$. В результате экспериментально снимаются данные кривой разгона скорости вращения объекта $\omega(t)$. В общем случае кривая разгона может быть снята с ненулевых значений входной $U_y(0)$ и выходной $\omega(0)$ величин в малых отклонениях входного сигнала $\Delta U_y(t)$ с малым приращением $\Delta U_{у.зад}$ и выходного сигнала $\Delta \omega(t)$.

2. Определяется величина запаздывания τ , как время, за которое значение кривой $\omega(t)$ с момента приложения сигнала управления $U_y(t)$ не превышает 0,5–1 % от установившегося значения $\omega_{уст}$ кривой разгона $\omega(t)$.
3. Определяется коэффициент усиления модели объекта

$$K_M = \frac{\omega_{уст}}{U_{у.зад}}$$

4. Рассчитывается вспомогательная функция

$$\varphi(t) = \frac{\omega_{уст} - \omega(t + \tau)}{\omega_{уст}}$$

5. Составляется система из $N = m + n$ алгебраических уравнений

$$a_k = b_k + S_k + \sum_{j=1}^{k-1} b_j S_{k-j}, \quad (3)$$

где $k=1, \dots, N$; S – площади вспомогательной функции $\varphi(t)$

$$S_k = \mu_{k-1} + \sum_{j=0}^{k-2} \mu_j S_{k-1-j};$$

μ – моменты вспомогательной функции $\varphi(t)$

$$\mu_{k-1} = \frac{1}{(k-1)!} \int_0^{\infty} (-t)^{k-1} \varphi(t) dt.$$

Система алгебраических уравнений (3) решается относительно коэффициентов a_k и b_k . При этом $a_{n+1} = \dots = a_N = 0$ и $b_{m+1} = \dots = b_N = 0$.

Обработка данных

Учитывая общее описание привода (1), примем передаточную функцию модели в виде

$$W_M(p) = \frac{K_M}{1 + a_1 p + a_2 p^2} e^{-\tau p},$$

где

$$K_M = \frac{\omega_{уст}}{U_{у.зад}}; \quad \tau = T_{\Pi}; \quad a_1 = T_M; \quad a_2 = T_3 T_M.$$

Исходя из (2) суммарный момент инерции определится следующим образом

$$J_{\Sigma} = \beta T_M = \beta a_1. \quad (4)$$

Для определения суммарного момента инерции J_{Σ} необходимо определить жёсткость β и коэффициент a_1 , который, по выражению (3), вычисляется следующим образом

$$a_1 = S_1 = \mu_0 = \int_0^{\infty} \varphi(t) dt.$$

Вычисление запаздывания τ , вместо выполнения п. 2 алгоритма Симою, осуществляется приравнением постоянной времени преобразователя T_{Π} . Такая замена апериодического звена с постоянной времени T_{Π} на звено запаздывания $e^{-\tau p}$ приемлема, т. к. $T_{\Pi} \ll T_M$.

Для расчёта данных вспомогательной функции φ_i определяется момент времени t_i , следующий за значением времени запаздывания τ :

$$t_i = \min\{t_i \mid t_i \geq \tau\},$$

тогда

$$\varphi_j = \frac{\omega_n - \omega_{j+l}}{\omega_n - \omega_0}, \quad j = 0, \dots, n-l,$$

где $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_l, \dots, \omega_n$ – измеренные значения кривой разгона $\omega(t)$ в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_l, \dots, t_n$ соответственно.

Здесь установившееся значение определится как $\omega_{уст} = \omega_n - \omega_0$.

Для коэффициента a_1 интеграл функции $\varphi(t)$ вычислим методом трапеций

$$a_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-l} (\varphi_j + \varphi_{j-1})(t_j - t_{j-1}). \quad (5)$$

Проведение эксперимента в среде MatLAB

Для проведения эксперимента по определению суммарного момента инерции в качестве примера выбран электропривод постоянного тока с тиристорным преобразователем со встречно-параллельной схемой и совместным управлением.

Принят абсолютно жёсткий механизм. На рис. 1 представлена имитационная модель привода, составленная с помощью элементов библиотеки SimPowerSystems среды MatLAB.

Результатом являются экспериментальные данные скорости ω_i и времени t_i , где $i=0, \dots, n$, разность между моментами времени в начале временного интервала должна быть меньше, чем время запаздывания τ . Конечное время эксперимента t_k должно быть достаточным, чтобы переходный процесс установился, так что примем $\omega_{уст} = \omega_n$.

Эксперимент проходит в два этапа (рис. 2):

1. Электропривод работает без нагрузки, со скоростью холостого хода ω_{01} , соответствующей заданному сигналу управления U_{y1} . В момент времени t_1 осуществляется приращение по сигналу управления ΔU_y до значения $U_{y2} = U_{y1} + \Delta U_y$. В результате получаем кривую разгона до скорости холостого хода ω_{02} . По данным кривой разгона в соответствии с методом Симою вычисляется коэффициент модели a_1 по формуле обработки данных (5).
2. При холостом ходе ω_{02} в момент времени t_2 на механизм оказывается возмущающее воздействие статическим моментом на вал двигателя M_c . В результате скорость двигателя изменяется до значения ω_{c3} , которое измеряется в момент t_3 . Оценивается статический момент нагрузки и изменение скорости вала двигателя

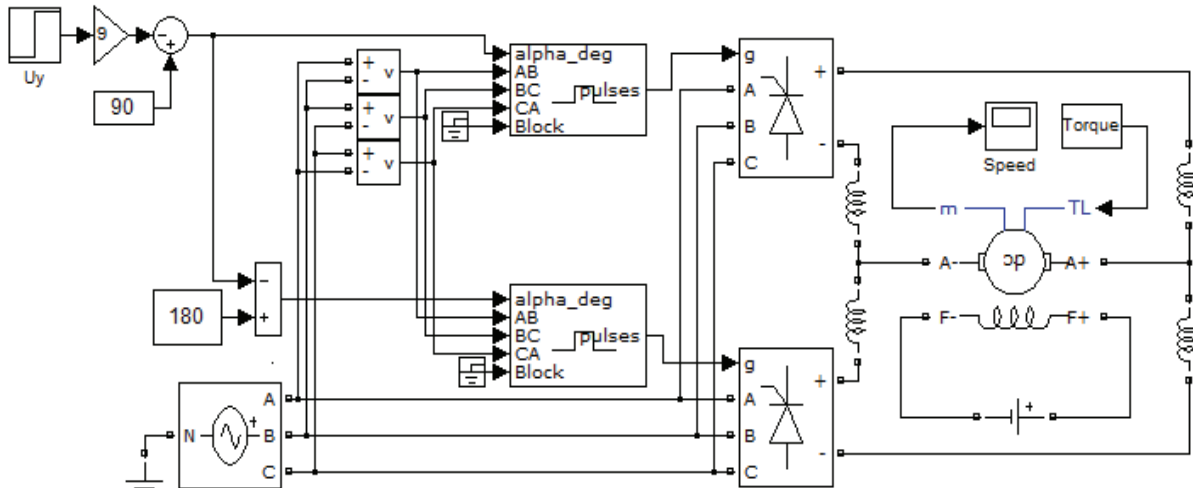


Рис. 1. Имитационная модель привода постоянного тока в среде MatLAB

Fig. 1. Simulation model of the dc drive in MatLAB

$\Delta\omega = \omega_{02} - \omega_{c3}$. Рассчитывается жёсткость механической характеристики электропривода $\beta = \frac{M_c}{\Delta\omega}$ и суммарный момент инерции J_Σ по формуле (4).

Статический момент измерим косвенным способом: измеряя напряжение якоря $U_\text{я}$ и скорость якоря при холостом ходе, а также статический ток якоря при нагрузке, измеряемый в момент времени t_3 :

$$I_{\text{яс}} = I_\text{я}(t_3).$$

Статический момент определим исходя из соотношения

$$M_c = C\Phi I_{\text{яс}}. \quad (6)$$

Постоянную двигателя СФ можно определить из соотношения

$$U_\text{я} = C\Phi\omega_0, \quad (7)$$

где значения $U_\text{я}$ и ω_0 измеряются в моменты времени t_1 или t_2 .

Значение статического тока $I_{\text{яс}}$ измеряется в конечный момент времени t_3 (рис. 2). Выразим из

(7) постоянную СФ и подставим в (6). Приращение по скорости после статической нагрузки на валу двигателя $\Delta\omega = \omega_{02} - \omega_{c3}$. В результате жёсткость механической характеристики привода постоянного тока определим по формуле

$$\beta = \frac{M_c}{\Delta\omega} = \frac{U_\text{я}(t_2)I_{\text{яс}}}{\omega_{02}(\omega_{02} - \omega_{c3})}. \quad (8)$$

Обработка данных эксперимента и расчёт суммарного момента инерции по (4) осуществляется после совершения эксперимента аналитическими вычислениями (5) и (8), не требующими человеческого вмешательства. Это позволяет создавать системы с непрямым адаптивным управлением, где осуществляется автонастройка параметров регуляторов на основе эксперимента.

Данный алгоритм реализуется программно и может быть использован в контроллере привода, что соответствует принципам автонастройки систем автоматического регулирования.

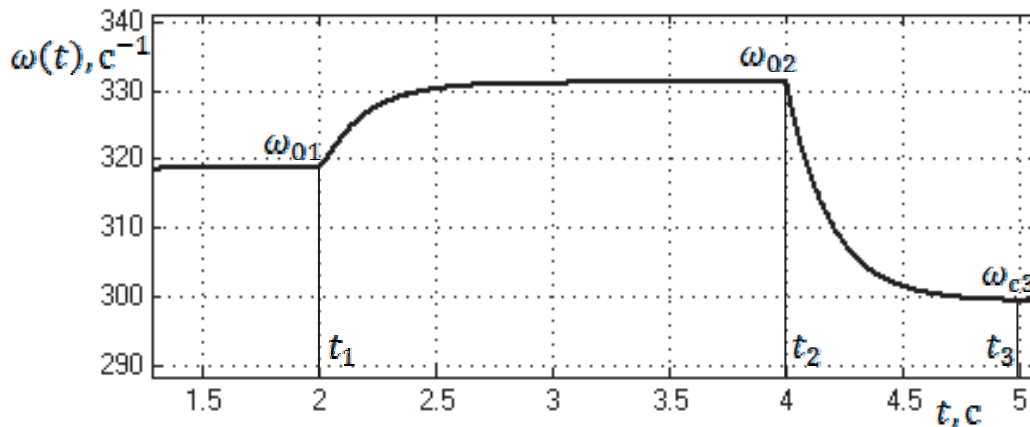


Рис. 2. Этапы эксперимента в методике определения момента инерции

Fig. 2. The stages of the experiment in the technique for determining inertia moment

Исследование точности определения суммарного момента инерции привода

Целью исследования является определение условий эксперимента, при которых обеспечивается высокая точность определения суммарного момента инерции. Для этого осуществляется вычисление относительной ошибки суммарного момента инерции привода при различных:

- характерах переходных процессов скорости привода;
- значениях ΔU_y и начальных значениях U_{y1} сигнала управления;
- значениях суммарного момента инерции J_Σ .

Для расчёта суммарного момента инерции нет необходимости определять коэффициент a_2 . Это упрощает модель привода до аperiodического звена первого порядка со звеном запаздывания. Следовательно, возникает вопрос исследования о влиянии на ошибку определения суммарного момента инерции при различных соотношениях электромеханической постоянной времени и электромагнитной постоянной времени привода.

Для исследования выбраны два двигателя с различными характерами переходных процессов скорости: 2ПБ160L с аperiodическим и 2ПФ200L с колебательным переходным процессом. Расчётные параметры привода с каждым из двигателей при заданном суммарном моменте инерции $J_\Sigma = 1,2J_{дв}$ приведены в табл. 1.

Для проверки идентичности имитационной модели с линеаризованной моделью (1) произведено моделирование переходных процессов скорости привода, полученных при малом приращении сигнала управления (рис. 3).

Проверка метода Симоу на линеаризованной модели (1) показала нулевую ошибку определения суммарного момента инерции. В имитационной модели (рис. 1) работа реверсивного тиристорного преобразователя с совместным управлением осуществляется адекватнее, чем работа аperiodического звена первого порядка. В результате интерес

представляет исследование точности определения J_Σ при различных значениях больших и малых воздействий.

Таблица 1. Расчётные параметры исследуемых приводов с двигателями

Table 1. Design parameters of the experimental drives with engines

Параметр Parameter	2ПБ160L	2ПФ200L
Момент инерции двигателя $J_{дв}$, кг·м ² $J_{дв}$ engine inertia moment, kg·m ²	0,1	0,3
Электромеханическая постоянная времени T_M , с Electromechanical time constant T_M , s	0,12	0,0314
Электромагнитная постоянная времени T_Σ , с Electromagnetic time constant T_Σ , s	0,0123	0,0147
Коэффициент демпфирования переходных процессов Transient damping factor	1,56	0,73
Характер переходных процессов Transient behavior	Аperiodический Aperiodic	Колебательный Oscillatory

Проведём исследование значения относительной ошибки суммарного момента инерции ΔJ_Σ при изменении сигнала управления U_{y1} и его приращении ΔU_y , а также при изменении значений J_Σ . Определение относительной ошибки суммарного момента инерции осуществляется по формуле

$$\Delta J_\Sigma = \frac{J_\Sigma^m - J_\Sigma}{J_\Sigma^m} \cdot 100 \%,$$

где J_Σ^m – заданный в имитационной модели суммарный момент инерции; J_Σ – вычисленное методом Симоу значение суммарного момента инерции по экспериментальным данным.

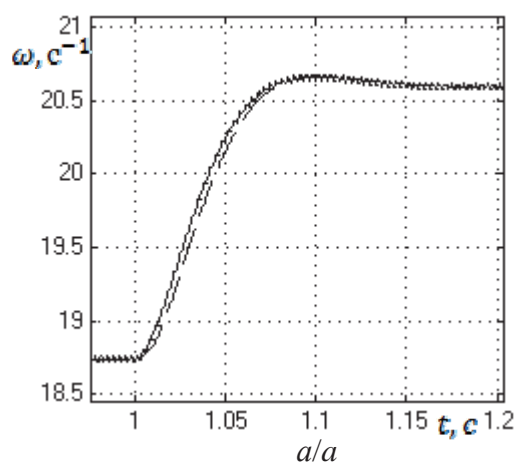


Рис. 3. Переходные процессы скорости имитационной (—) и линеаризованной (---) моделей привода с двигателями 2ПФ200L (а) и 2ПБ160L (б)

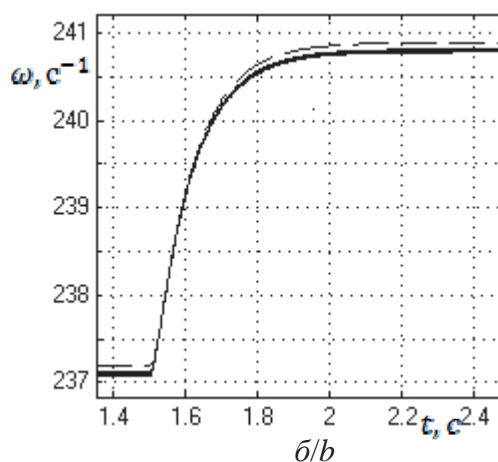


Fig. 3. Transients of simulation (—) and linearized (---) model speed with the engines 2ПФ200L (a) and 2ПБ160L (b)

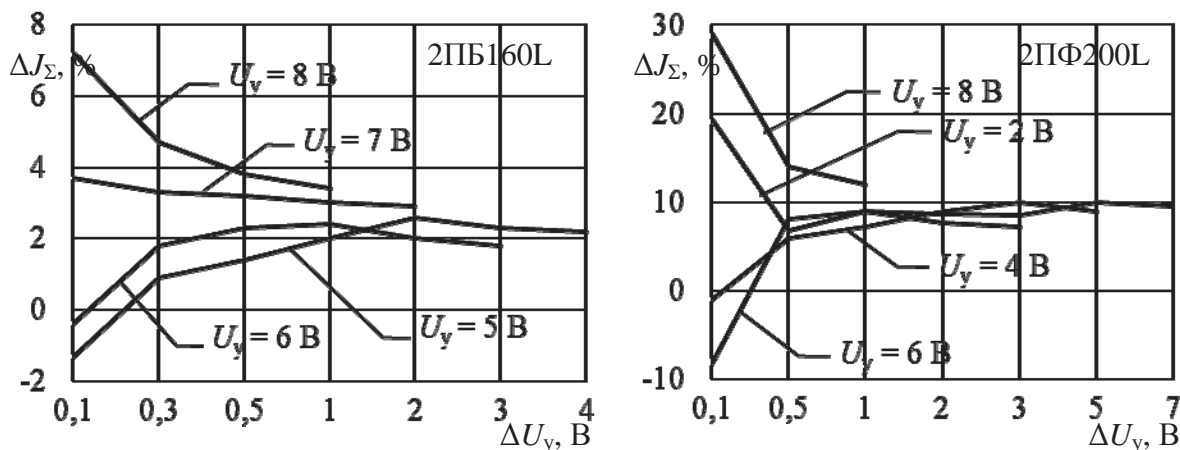


Рис. 4. Ошибка определения момента инерции ΔJ_{Σ} при варьировании U_y и ΔU_y

Fig. 4. Error in determining the inertia moment ΔJ_{Σ} at variation of U_y and ΔU_y

На рис. 4 представлены результаты вычисления ΔJ_{Σ} в значениях U_{y1} и ΔU_y и постоянном значении суммарного момента инерции $J_{\Sigma} = 1,2 J_{ДВ}$ и максимальном значении сигнала управления $U_{y,max} = 10$ В для двух приводов с рассматриваемыми двигателями.

Исследуя диаграммы результатов на рис. 4 можно сделать следующие наблюдения:

1. При малых ΔU_y ошибка ΔJ_{Σ} является нестабильной и варьируется в значительных пределах, в зависимости от значения U_y .
2. При больших ΔU_y ошибка ΔJ_{Σ} стремится к постоянной величине и мало зависит от значения U_y .
3. Точность вычисления J_{Σ} зависит от качества переходных процессов: для привода с низким демпфированием ошибка ΔJ_{Σ} выше.

По результатам наблюдения можно сделать следующие выводы:

1. Соотношение постоянных времени привода T_{Σ} и T_M влияет на ошибку ΔJ_{Σ} . При увеличении влияния механической составляющей привода относительно её электромагнитной составляющей ошибка ΔJ_{Σ} уменьшается. Это ограничивает применение метода Симою для приводов с малым коэффициентом демпфирования переходных процессов. К таким относятся привода с упругими связями. Для решения этой проблемы необходимо использовать передаточную функцию модели более высокого порядка, тогда возникает вопрос о точности определения коэффициентов передаточной функции модели для членов полиномов высокого порядка.
2. Наиболее приемлемая стабильность определения ΔJ_{Σ} выполняется при больших ΔU_y . Тогда в качестве кривой разгона нужно рассматривать пусковую характеристику привода при максимально возможном U_y .

На рис. 5 представлена диаграмма результатов вычисления ΔJ_{Σ} на основе обработки данных эксперимента при $U_y = 0$ В и $\Delta U_y = 0,9 U_{y,max}$ с учётом максимального угла открывания тиристоров $\alpha_{max} = 165^\circ$. Из диаграммы видно, что с возрастани-

ем значения J_{Σ} ошибка ΔJ_{Σ} уменьшается, что подтверждает первый вывод.

Ограничением для U_y является получение пусковой характеристики привода, при которой значение тока якоря $I_{я}$ не достигает максимального значения $I_{я,max}$

$$I_{я,max} > I_{я} = \frac{U_d}{R_{яц}},$$

где U_d – выпрямленное напряжение на выходе тиристорного преобразователя; $R_{яц}$ – активное сопротивление якорной цепи.

Для рассматриваемого привода постоянного тока с системой импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем вертикального типа [20] $U_d = U_{d0} \cos \alpha$, где угол открывания тиристоров

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{U_y}{U_{y,max}} \right).$$

допустимое значение для максимального тока якоря $I_{я,max}$

$$\begin{aligned} \alpha_{доп} &= \arccos \frac{U_{d,доп}}{U_{d0}} = \arccos \frac{I_{я,max} R_{яц}}{U_{d0}} = \\ &= \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{U_{y,доп}}{U_{y,max}} \right). \end{aligned}$$

Из равенства двух последних членов получим допустимое значение сигнала управления для рассматриваемого привода

$$U_{y,доп} = U_{y,max} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{I_{я,max} R_{яц}}{U_{d0}} \right). \quad (9)$$

Максимальное значение тока якоря $I_{я,max}$ является паспортными данными двигателя. Значения U_{d0} и $R_{яц}$, как указывалось выше, необходимо определять тестированием. Жёсткость механической характеристики привода β необходимо определять по значениям постоянной ДПТ СФ и $R_{яц}$ [18]. Параметр СФ можно определить по паспортным данным двигателя, например

$$\cos\Phi = \frac{P_H}{\omega_H I_{яH}}, \quad (10)$$

где P_H , ω_H , $I_{яH}$ – номинальные значения мощности, скорости и тока якоря двигателя.

Расчёт β по данным на основе тестирования электрической цепи якоря избавляет от нежелательного второго этапа эксперимента, где необходимо прикладывать нагрузку на вал двигателя.

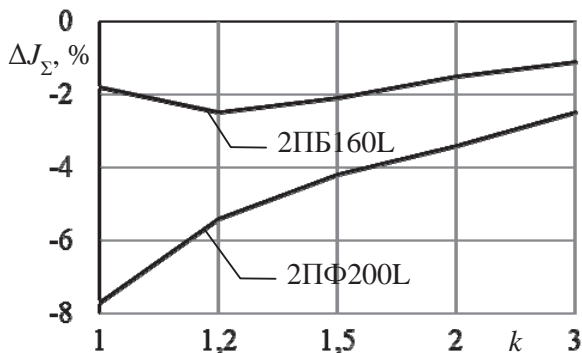


Рис. 5. Ошибка определения момента инерции ΔJ_Σ по данным пусковой характеристики привода при различной кратности момента инерции $J_\Sigma = kJ_{дв}$

Fig. 5. The error in determining the inertia moment ΔJ_Σ by the data of the drive starting characteristic at different ratio of the inertia moment $J_\Sigma = kJ_{дв}$

На рис. 6 приведена модель рассматриваемого привода, где имитируется тестирование параметров U_{d0} и $R_{яц}$ в соответствии с методами измерения параметров обмоток электрических машин [21], которая может проводиться в автоматическом режиме:

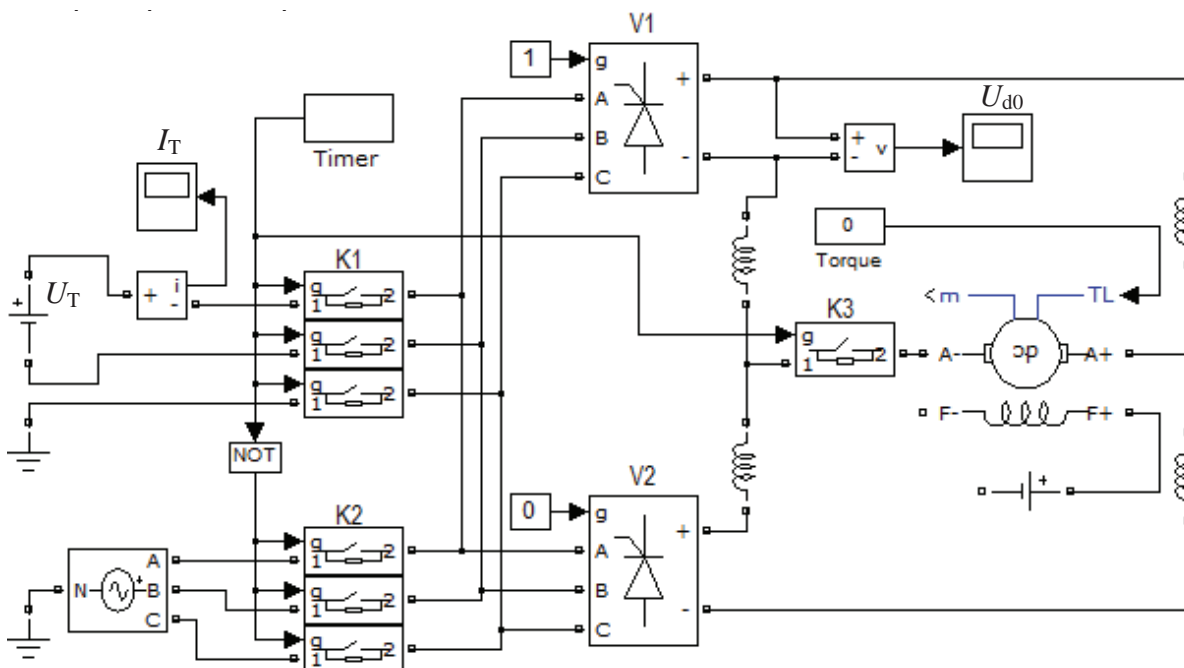


Рис. 6. Имитация тестирования привода постоянного тока в среде MatLAB

Fig. 6. Simulation of dc drive test in MatLAB

1. Отключается обмотка возбуждения. Прямая группа клапанов V1 полностью открыта, а обратная V2 полностью закрыта.
2. Включается временная программа Timer, которая сначала замыкает переключатели K1 и K3. В результате к якорной цепи через фазы А и В сети для тестирования подводится постоянное низковольтное напряжение U_T . Измеряется ток в якорной цепи I_T и вычисляется активное сопротивление

$$R_{яц} = \frac{U_T}{I_T}. \quad (11)$$

3. Затем программа Timer размыкает K1 и K3 и замыкает K2. В результате якорь двигателя отключается от преобразователя и на вход преобразователя подаётся напряжение сети. Вольтметром на выходе преобразователя измеряется напряжение U_{d0} .
4. По формуле (9) вычисляется значение сигнала управления для получения пусковой характеристики привода.

Методика идентификации суммарного момента инерции привода

Алгоритм определения J_Σ для адаптивных систем с косвенным управлением:

1. Привод отключается от всех обратных связей.
2. Проводится тестирование электрической цепи привода. В результате определяются значения $R_{яц}$ и U_{d0} . В соответствии с паспортными данными двигателя по формулам (10) и (9) вычисляются параметры $\cos\Phi$ и $U_{y,доп}$. Зная $\cos\Phi$ и $R_{яц}$ вычисляется жёсткость β .

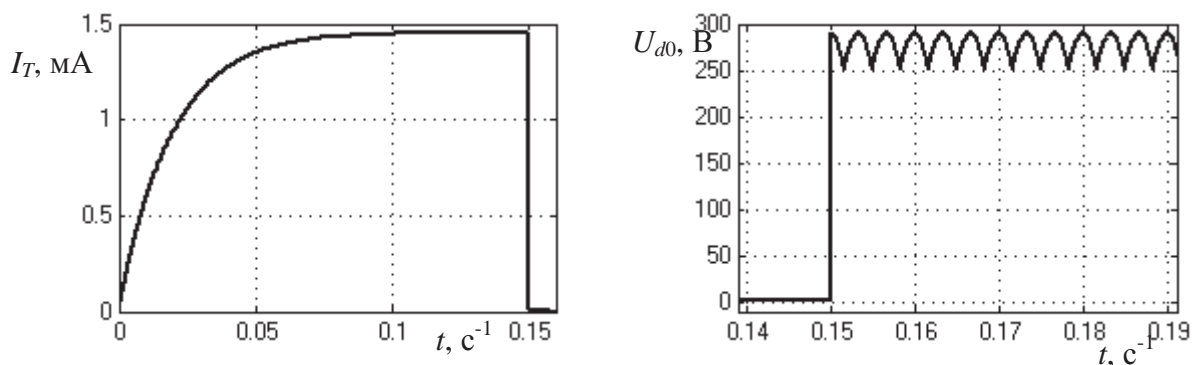


Рис. 7. Ток в цепи якоря I_T и выпрямленное напряжение U_{d0} при холостом ходе на выходе преобразователя

Fig. 7. Current in the circuit of I_T armature and rectified voltage U_{d0} in no-load running at the converter output

3. Осуществляется разгон привода на холостом ходе при сигнале управления со значением $U_{y,доп}$. В результате получается пусковая характеристика скорости привода, которая обрабатывается методом Симою, и по формулам (5) и (4) вычисляется значение J_{Σ} .

Пример определения момента инерции привода

Рассмотрим применение методики на примере электропривода постоянного тока с двигателем 2ПБ160L и суммарным моментом инерции $J_{\Sigma}=1,2J_{дв}=0,12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. На рис. 7 представлены результаты тестирования электрической цепи привода. При измерении ток в цепи при тестирующем напряжении $U_T=1 \text{ мВ}$ составил $I_T=1,456 \text{ мА}$.

Практически, мультиметр покажет измеренное значение активного сопротивления по формуле (11)

$$R_{яц}^* = \frac{1}{1,456} = 0,687 \text{ Ом.}$$

Затем при измерении выпрямленного напряжения при холостом ходе на выходе преобразователя мультиметр по среднеквадратичному значению покажет $U_{d0}^*=277 \text{ В}$.

На основе паспортных данных двигателя 2ПБ160L:

- номинальная мощность $P_H=7500 \text{ Вт}$;
- номинальная скорость вращения якоря $\omega_H=234,6 \text{ с}^{-1}$;
- номинальный ток якоря $I_{яH}=38,7 \text{ А}$,

вычисляется постоянная двигателя по формуле (10)

$$C\Phi = \frac{7500}{234,6 \cdot 38,7} = 0,825,$$

и жёсткость β по формуле [21]

$$\beta = \frac{C\Phi^2}{R_{яц}} = \frac{0,825^2}{0,687} = 0,991.$$

По формуле (9) вычисляется допустимое значение сигнала управления $U_{y,доп}=2,51 \text{ В}$, при котором осуществляется эксперимент, где получаем кривую разгона скорости привода (рис. 8, а). На рис. 8, б видно, что ток якоря не достигает максимального значения для двигателя 2ПБ160L $I_{я,макс}=4I_{яH}=154,8 \text{ А}$.

В результате обработки данных кривой скорости по формуле (5) вычисляется коэффициент $a_1=0,1218$, и по формуле (4) вычисляется значение суммарного момента инерции $J_{\Sigma}=0,1283 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Ошибка определения J_{Σ} составляет около 1,5 %.

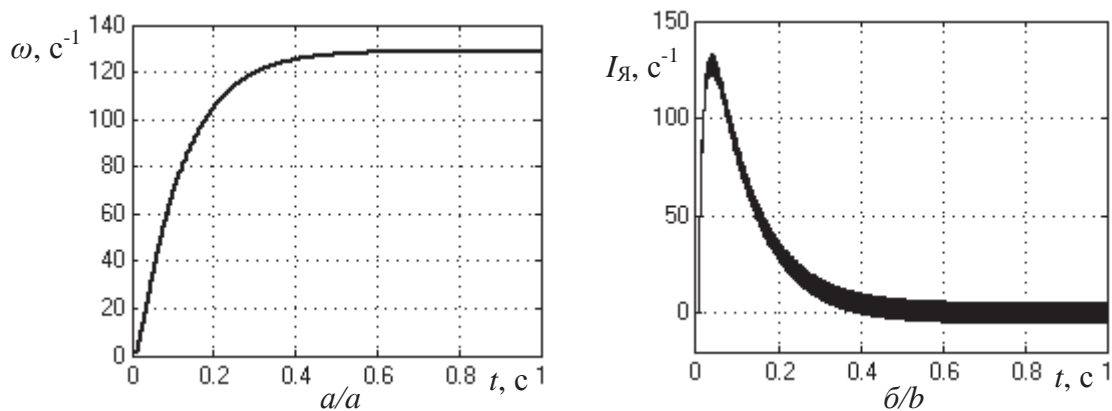


Рис. 8. Переходные процессы скорости (а) и тока якоря (б) привода с двигателем 2ПБ160L при значении сигнала управления преобразователем $U_y=2,51 \text{ В}$

Fig. 8. Transients of the velocity (a) and the armature current (b) of the drive with the engine 2ПБ160L at the converter control signal value $U_y=2,51 \text{ В}$

Влияние моментов трения на точность определения момента инерции

Самые большие силы трения для станочных приводов, удерживающих обрабатываемую деталь, характерны для приводов подач фрезерных станков, где перемещается стол с деталью. Момент трения привода стола с деталью, но без обработки, составляет не более 10 % от номинального момента двигателя. Результаты исследования точности вычисления момента инерции привода при статическом реактивном моменте на валу двигателя $M_c=0,1M_H$ представлены на рис. 9.

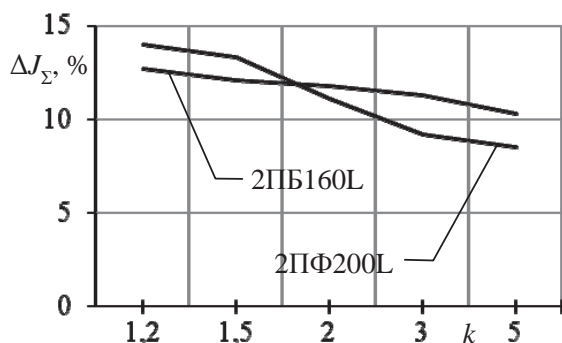


Рис. 9. Ошибка определения момента инерции ΔJ_Σ при различной кратности момента инерции $J_\Sigma = kJ_{дв}$ и реактивном статическом моменте $M_c = 0,1M_H$

Fig. 9. Error in determining the inertia moment ΔJ_Σ at different ratio of the inertia moment $J_\Sigma = kJ_{дв}$ and reactive static moment $M_c = 0,1M_H$

Ошибка определения $J_{тс}$ для привода стола фрезерного станка, когда используется редукторный привод $J_\Sigma = (1,2-1,5)J_{дв}$, составляет не более 15 %.

При $J_\Sigma \geq 5J_{дв}$, что характерно для безредукторных приводов, ошибка составляет менее 10 %.

Для токарных приводов главного движения, где удерживается обрабатываемая деталь, моменты сил трения на порядок ниже, чем у привода стола фрезерных станков. Поэтому ошибка определения J_Σ для привода главного движения токарного станка не будет превышать 2 % как для редукторного, так и для безредукторного привода.

Выводы

Приведена методика определения суммарного момента инерции привода в разомкнутом электроприводе с использованием метода Симою. Методика осуществляется вычислительными процедурами обработки массива данных, полученных по кривой разгона привода. Это позволяет проводить идентификацию момента инерции в автоматических системах настройки регуляторов электроприводов. Оценка момента инерции осуществляется с достаточно приемлемой точностью для приводов с жёсткими связями.

Рассмотрен пример применения методики для привода постоянного тока с тиристорным преобразователем, где ошибка определения момента инерции составила 1,5 %. Рассмотренная методика позволяет строить системы с автоматической настройкой регуляторов, где реализован алгоритм идентификации момента инерции рассмотренной методикой, что позволяет повысить уровень автоматизации технологических комплексов.

Недостатком данной методики является ограниченная область приводов, в которых момент инерции не связан с моментом нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борцов Ю.А., Суворов Г.В., Шестаков Ю.С. Экспериментальное определение параметров и частотных характеристик автоматизированных электроприводов. – Л.: Энергия, 1969. – 104 с.
- GATCHINA prom-automation Ltd. Серводвигатели Siemens. URL: <http://www.g-p-a.ru/electroprivod/servomotor/24-servodvigateli-siemens.html> (дата обращения: 20.07.2014).
- Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
- Денисов В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления. – М.: Изд-во «Спутник +», 2013. – 122 с.
- Алексеев А.С., Замятин С.В., Плотников Д.А. Определение момента инерции электропривода по временным характеристикам // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 65–69.
- Устройство для определения частотных характеристик функционирующих объектов; пат. 2285282 Рос. Федерация, МПК G05B 23/02; заявл. 04.01.2003; 10.10.2006, Бюл. № 28. – 1 с.
- Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 86–99.
- Мазуров В.М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования // Компоненты и технологии. – 2003. – № 5. – С. 59–62.
- Aström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control // Journal of Process Control. – 2004. – V. 14. – Iss. 6. – P. 635–650.
- Tan K.K., Lee T.H., Jiang X. Robust on-line relay automatic tuning of PID control systems // ISA Transactions. – 2000. – V. 39. – Iss. 2. – P. 219–232.
- Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. – 2006. – V. 26. – P. 15–19.
- PID auto-tuning using new model reduction method and explicit PID tuning rule for a fractional order plus time delay model / Y.J. Cheon, H.R. Kyung, W.S. Su, L. Jietae, L. In-Beum // Journal of Process Control. – 2014. – V. 24. – Iss. 1. – P. 113–128.
- Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // Journal of Process Control. – 2003. – V. 13. – Iss. 4. – P. 291–309.
- Стезьмащук С.В. Оценка качества системы автоматического регулирования на основе упрощённой модели // Учёные записки КнАГТУ. – 2010. – № 1. – С. 36–39.
- Стезьмащук С.В. Об аналитическом синтезе по прямым показателям качества на основе упрощённой модели // Учёные записки КнАГТУ. – 2011. – № 4. – С. 12–17.
- Стезьмащук С.В., Чернов А.Ю. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование // Электро-

- технические системы и комплексы: Междунар. сборник научных трудов. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – С. 256–265.
17. Стедьмащук С.В. Настройка ПИД-регулятора по кривой разгона объекта с самовыравниванием для максимального быстродействия с заданным перерегулированием при идентификации объекта моделью первого порядка с запаздыванием // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 2. – С. 81–90.
 18. Автоматизированный электропривод промышленных установок / под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
 19. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 6. – С. 514–527.
 20. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.
 21. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / под ред. М.Г. Зименкова, Г.В. Розенберга, Е.М. Феськова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.

Поступила 21.10.2014 г.

UDC 681.5.015

IDENTIFICATION OF ELECTRIC DRIVE INERTIA MOMENT ON THE REACTION CURVE BY SIMOYU METHOD

Segey V. Stelmashchuk,

Komsomolsk-na-Amure State Technical University, 27, Lenin Avenue, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russia. E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop the systems with controller auto-tuning for electric drive control systems with variable inertia in a wide range.

The main aim of the study is to derive the technique for identifying a drive inertia moment based on data processing of the drive speed reaction curve by Simoyu method. The obligatory condition is the implementation of the techniques by the compute aids based on the control systems.

The methods used in the study. The theoretical research was based on the methods of classic control theory and the theory of the electric drive. Practical researches are confirmed by simulation in software environment of MatLAB.

The results. The author has developed the technique, which allows determining the inertia moment of the drive using the computer aids in the automatic mode based on the data of drive reaction curve. The application of this technique in the adaptive systems with auto-tuning controller was justified. The author studied the implementation of conditions of the technique and determined that it is more efficient to use the starting characteristic in no-load drive as the reaction curve. The allowable value of the control signal, in which the armature current does not exceed a maximum value, was computed. To prove this technique the author carried out simulation in SimPowerSystems package of MatLAB. It is shown that the above technique is preferable for electric drives with rigid connections in mechanic of the drive, which is a limitation when using the Simoyu method.

Conclusions. The developed technique for defining the inertia moment of the electric drive, based on the Simoyu areas method, allows implementing the identification algorithm of inertia moment in the automatic mode. This will increase the level of technological systems automation by introducing the systems with automatic tuning, which implement the identification algorithm.

Key words:

Machine electric drive, identification of the inertia moment, Simoyu technique, auto-tuning of controller.

REFERENCES

1. Bortsov Yu.A. Suvorov G.V., Shestakov Yu.S. *Ekspperimentalnoe opredelenie parametrov i chastotnykh kharakteristik avtomatizirovannykh elektroprivodov* [Experimental determination of the parameters and frequency characteristics of automated electric]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 104 p.
2. GATCHINA prom-automation Ltd. *Servodvigateli Siemens*. Available at: <http://www.g-p-a.ru/electroprivod/servomotor/24-servodvigateli-siemens.html> (accessed 20 July 2014).
3. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernye, nelineynye, optimalnye i adaptivnye sistemy* [Automatic Control Theory. Vol. 2. Multi-dimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004. 464 p.
4. Denisov V.A. *Sistemy pozitsionnogo elektroprivoda s peremennoy strukturoy upravleniya* [Systems of positional electric drive with variable structure control]. Moscow, Sputnik + Publ., 2013. 122 p.
5. Alekseev A.S., Zamyatin S.V., Plotnikov D.A. *Opreделение momenta inertsii elektroprivoda po vremennym kharakteristikam* [Determination of electric drive inertia moment by time characteristics]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no 5, pp. 65–69.
6. Goryachev V.F., Gudim A.S. *Ustroystvo dlya opredeleniya chastotnykh kharakteristik funktsioniruyushchikh obektov* [Device for determining frequency characteristics of operating objects]. Patent RF, no. 2285282, 2006.
7. Denisenko V.V. *PID-regulyatory: voprosy realizatsii. Ch. 2 [PID controllers: implementation issues. P. 2]. Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2008, no. 1, pp. 86–99.
8. Mazurov V.M. *Avtomaticheskije regulyatory v sistemakh upravleniya i ikh nastroyka. Ch. 2. Avtomaticheskije regulyatory i ikh nastroyka. Obshchie svedeniya o promyshlennykh sistemakh regulirovaniya* [Automatic regulators in control systems and their settings. P. 2. Automatic control and adjustment. General informa-

- tion on the industrial control systems]. *Komponenty i tekhnologii*, 2003, no. 5, pp. 59–62.
9. Aström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 2004, vol. 14, Iss. 6, pp. 635–650.
 10. Tan K.K., Lee T.H., Jiang X. Robust on-line relay automatic tuning of PID control systems. *ISA Transactions*, 2000, vol. 39, Iss. 2, pp. 219–232.
 11. Oviedo J.J.E., Boelen T., Van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, vol. 26, pp. 15–19.
 12. Cheon Y.J., Kyung H.R., Su W.S., Jietae L., In-Beum L. PID auto-tuning using new model reduction method and explicit PID tuning rule for a fractional order plus time delay model. *Journal of Process Control*, 2014, vol. 24, Iss. 1, pp. 113–128.
 13. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 2003, vol. 13, Iss. 4, pp. 291–309.
 14. Stelmashchuk S.V. Otsenka kachestva sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya na osnove uproshchennoy modeli [Estimation of quality of the automatic control system based on the simplified model]. *Uchionye zapiski KnAGTU*, 2010, no. 1, pp. 36–39.
 15. Stelmashchuk S. V. Ob analiticheskom sinteze po pryamym pokazatelyam kachestva na osnove uproshchennoy modeli [An analytical synthesis on direct indicators of quality based on the simplified model]. *Uchionye zapiski KnAGTU*, 2011, no. 4, pp. 12–17.
 16. Stelmashchuk S.V., Chernov A.Yu. Sintez PID-regulyatora sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya s maksimalnym bystrodeystviem i ogranicheniem na pereregulirovanie [Synthesis of PID automatic control system with maximum speed and restriction on overshoot]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Intern. collection of scientific papers*. Magnitogorsk, MGTU im. G.I. Nosova Publ., 2012. pp. 256–265.
 17. Stelmashchuk S.V. Nastroyka PID-regulyatora po krivoy razgona obekta s samovyrvnivanem dlya maksimalnogo bystrodeystviya s zadannym pereregulirovanem pri identifikatsii obekta modelu pervogo poryadka s zapazdyvanem [Setting the PID by the ramp object with self-leveling for speed with the predetermined overshoot in object identification by the first order model with delay]. *Vestnik TOGU*, 2013, no. 2, pp. 81–90.
 18. Onishchenko G.B. *Avtomatizirovanny elektropriwod promyshlennykh ustanovok* [Automation electric drive of industrial plants]. Moscow, RASHN Publ., 2001. 520 p.
 19. Simoyu M.P. Opredelenie koeffitsientov peredatochnykh funktsiy linearizovannykh zvenev sistem regulirovaniya [Definition of the transfer functions coefficients of the linearized links of control systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1957, no. 6, pp. 514–527.
 20. Krupovich V.I., Barybin Yu.G., Samover M.L. *Spravochnik po proektirovaniyu avtomatizirovannogo elektroprivoda i sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Handbook on designing automated electric drive and process control systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 416 p.
 21. Zimenkov M.G., Rozenberg G.V., Feskov E.M. *Spravochnik po nadelke elektrooborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy* [Handbook on adjustment of electrical equipment at enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 480 p.

Received: 21 October 2014.

УДК 621.311

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ГАРМОНИК НА ПРИМЕРЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Волошко Анатолий Васильевич,

д-р техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский Политехнический Институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

Филянин Даниил Владимирович,

аспирант кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский Политехнический Институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: dany@nm.ru

Актуальность работы обусловлена изменившейся структурой электропотребления, связанной с ростом доли нелинейных нагрузок и необходимостью достоверного определения источников гармоник в распределительной сети для эффективного функционирования системы штрафов и санкций.

Цель работы: исследования по определению виновников искажения кривой напряжения в точке общего подключения на примере упрощенной модели системы электроснабжения.

Методы исследования. Режимы работы модели рассчитываются с помощью приложения Simulink, входящего в пакет программ Matlab 2014a. Для моделирования использовалась библиотека SimPowerSystem, в состав которой входят математические модели отдельных элементов электроэнергетического оборудования. При выборе параметров модели распределительной сети использовались активные сопротивления, моделирующие кабельные линии и нагрузки, для упрощения расчетов. Для определения величины и знака мощности гармоник применялось преобразование Фурье.

Результаты исследования. Проведен обзор существующих методов определения виновников нарушения синусоидальности кривой напряжения в точке общего подключения распределительной сети, определены их достоинства и недостатки. На примере упрощенной модели системы электроснабжения проведены измерения знака и величины мощности гармоник в точке общего подключения и на клеммах потребителей для искажающих и неискажающих нагрузок. По результатам измерений определены отличия в значениях измеренных мощностей гармоник в точке общего подключения и на клеммах потребителей. Определены некоторые признаки наличия источников высших гармоник в нагрузке потребителей. Предложен новый подход к определению источников гармоник в распределительной сети по методу, основанному на измерении знака и величины искажающей мощности, согласно которому рекомендуется перенести точку измерения мощности гармоник из точки общего подключения на клеммы потребителя.

Ключевые слова:

Качество электроэнергии, гармоники, мощность искажения, коэффициент гармоник, источник искажения.

Введение

Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения (СЭС), то есть к появлению гармоник тока и напряжения. При этом энергосистема обязана поставлять электроэнергию только основной частоты 50 Гц с постоянной амплитудой.

Проблема гармоник в СЭС не нова. Еще в 30-х гг. XX в. в генераторах наблюдались искажения кривых тока и напряжения. Воздействие гармоник чревато нарушением работы энергетического оборудования и вредным воздействием на электроприемники потребителя. Некоторые последствия воздействия гармоник включают в себя [1, 2]:

1. Выход из строя батарей конденсаторов. При превышении гармониками тока допустимых уровней конденсаторные батареи не меняют своих характеристик, но быстро выходят из строя.

2. Влияние на системы передачи данных по силовым сетям. Гармоники представляют собой помеху несущей частоте аппаратуры передачи данных по силовым сетям, что вызывает потерю данных и некорректную работу удаленного оборудования, использующего такой тип связи.
3. Большие потери и перегрев синхронных и асинхронных машин.
4. Увеличение напряжений и токов гармоник в сети из-за последовательного или параллельного резонансов.
5. Пробой изоляции кабельных линий в результате перенапряжений, вызванных гармониками.
6. Помехи, создаваемые телекоммуникационным системам.
7. Влияние на точность приборов учета электроэнергии [3].
8. Нарушение работы устройств защиты или ухудшение их характеристик. Особенно чувствительны к гармоникам полупроводниковые и микропроцессорные системы.

9. Влияние на частотно-регулируемые приводы и системы возбуждения генераторов электростанций.
10. Вибрации вала асинхронных и синхронных машин.
11. Нестабильная работа цифровых реле, использующих в своей работе алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или определении точки пересечения нуля сигналами напряжения или тока.

Последствия воздействия гармоник также зависят от источника гармоник, его расположения в СЭС и характеристик сети [1]. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их фазового угла по отношению к основной гармонике [2].

По оценке европейских научно-исследовательских учреждений, в результате низкого качества электрической энергии в промышленности происходит потеря более 150 млрд евро в год. Из них на долю гармоник приходится 1,3 млрд евро [4]. Но если взять во внимание воздействие гармоник на аппаратуру релейной защиты и связанные с этим возможные отключения потребителей, то ущерб может составить суммы большего порядка – до 100 млрд евро [4].

Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей [2]. Эти документы не учитывают состав оборудования СЭС и, соответственно, ущерб, который могут нанести гармоники сетевому оборудованию и оборудованию потребителя.

Убытки, которые несут субъекты процесса распределения электрической энергии от ухудшения ее качества сверх допустимых норм [5, 6], должны оплачиваться виновниками нарушения качества. Для этого необходимо определить источники гармоник и оценить степень участия каждого в нарушении синусоидальности, чтобы с помощью системы штрафов и санкций стимулировать потребителя, искажающего параметры качества электроэнергии, устанавливать у себя компенсирующее оборудование.

Анализ литературных источников

На сегодняшний день нет общепринятого метода для обнаружения виновников нарушения синусоидальности напряжения [7].

В литературных источниках [8–12] можно выделить две группы подходов к определению источников искажений кривой напряжения в точке общего подключения (ТОП) [13]:

1. Группа, основанная на измерениях в ТОП с известным или неизвестным сопротивлением сети и потребителя.
2. Группа, основанная на измерениях, взятых в различных точках системы электроснабжения, с использованием методик оценки состояния системы [14].

Вторая группа подходов по определению источника гармоник используется для системообразующих сетей и предполагает сложные алгоритмы оптимизации размещения датчиков по всей системе энергоснабжения для оценки источников искажений (например, [15]).

Нас же интересует распределительная сеть, древовидная структура которой с единственным источником питания отличает их от сложноманкнутых системообразующих сетей и предопределяет направление потока мощности первой гармоники [16]. Вопрос об оптимизации размещения точек контроля не стоит, так как надо контролировать каждого субъекта СЭС (по аналогии с учетом потребления электроэнергии).

Рассмотрим методы определения источника искажения, относящиеся к первой группе:

1. Методы, основанные на определении знака и значения мощности гармоники, генерируемой источником высших гармоник [17]:

$$P_i = \frac{U_{ic} I_{ic} + U_{is} I_{is}}{2}; Q_i = \frac{U_{ic} I_{is} - U_{is} I_{ic}}{2},$$

где P_i , Q_i – активная и реактивная мощности i -й гармоники; U_{ic} , U_{is} – косинусная и синусная составляющая амплитуды напряжения i -й гармоники; I_{ic} , I_{is} – косинусная и синусная составляющая амплитуды тока i -й гармоники.

2. Метод деформирующей и не деформирующей нагрузки (deforming and non-deforming load) [18], согласно которому измеренный ток $i(t)$ является суммой не деформирующего $i_n(t)$ и деформирующего $i_d(t)$ токов:

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{U_1} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k + k(\varphi_1 - \theta_1)),$$

$$i_d(t) = i(t) - i_n(t),$$

где U_1 , I_1 – действующие значения напряжения и тока первой гармоники; θ_1 , φ_1 – фазы тока и напряжения первой гармоники; θ_k – фаза k -й гармоники напряжения.

3. Метод искажающего и не искажающего тока (distorted and non-distorted current) [19]. Нагрузка представляется в виде эквивалентного линейного сопротивления первой гармонике:

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1},$$

где U_1 , I_1 – действующие значения напряжения и тока первой гармоники, измеренные в ТОП.

Тогда

$$R = |Z_1| \cos \varphi_1, X_1 = |Z_1| \sin \varphi_1, L = \frac{X_1}{2\pi f_1},$$

где R – активная составляющая сопротивления нагрузки; X_1 – реактивное сопротивление нагрузки первой гармонике; φ_1 – разность фаз между векторами напряжения и тока первой гармоники; f_1 – частота сети (50 Гц); L – расчетная индуктивность нагрузки.

Расчетное сопротивление нагрузки гармоникам:

$$X_k = 2\pi k f_1 L,$$

где k – порядок гармоники.

Предполагая, что R не зависит от частоты и без учета поверхностного эффекта:

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + X_k^2},$$

$$\varphi_k = tg^{-1} \frac{X_k}{R}.$$

Ток, потребляемый идеальной линейной нагрузкой:

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^n \frac{U_k}{|Z_k|} \sqrt{2} \sin(2\pi k f_1 t + (\theta_k - \varphi_k)),$$

где θ_k – фаза вектора напряжения k -й гармоники; φ_k – разность фаз между векторами напряжения и тока k -й гармоники.

Разница между измеренным током и расчетным идеальным током называется нелинейным током:

$$i_{nL}(t) = i(t) - i_L(t),$$

где $i(t)$ – измеренный ток.

Сравнительный анализ этих методов определения источника искажения приведен в [13].

В вышеописанных методах определения источника гармоник все измерения проводятся в точке общего подключения. Второй и третий из перечисленных методов определения виновника искажения кривой напряжения в ТОП исходят из предположения линейности сопротивления нагрузки на всех частотах, что является не совсем корректным. Например, наличие фильтров высших гармоник сводит на нет это предположение. Более универсальным представляется метод определения знака и значения мощности гармоники, генерируемой источником гармоник, поскольку там используются только измеренные величины без каких-либо предположений. Недостатком метода определения источника искажения по знаку и величине мощности гармоники является отсутствие учета взаимных потоков искажающей мощности, возникающих при наличии нескольких источников искажения в СЭС [20]. В самом деле, ЭДС источников гармоник может иметь разную величину и внутреннее сопротивление. При измерении коэффициентов гармоник напряжения в ТОП мы получаем какую-то суммарную величину – результирующее значение всех источников искажения в сети.

По анализу литературных источников можно сделать вывод, что ни один из методов определения источников гармоник в СЭС не позволяет достоверно определить всех участников искажения кривой напряжения в ТОП. Следовательно, для полноценного функционирования системы штрафов и санкций за нарушение показателей качества электроэнергии остается актуальной проблема достоверного определения источников гармоник в СЭС.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы являются исследования по определению виновников искажения кривой напряжения в точке общего подключения.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- создать упрощенную схему СЭС с несколькими источниками гармоник;
- провести измерения величины и знака мощности гармоник, в ТОП и на клеммах потребителя;
- по результатам измерений сделать выводы.

Определение источников гармоник на примере упрощенной модели системы электроснабжения

Рассмотрим упрощенную схему распределительной сети с исключительно активными сопротивлениями линии и нагрузки (рис. 1).

ЭДС E_1 , E_2 и сопротивления нагрузки R_1 , R_2 образуют источник искажения, в котором R_1 и R_2 играют роль внутреннего сопротивления. Для примера взята 3-я гармоника, как наиболее распространенная и значимая по величине.

Было проведено два цикла измерений величины и знака мощности 3-й гармоники и коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения. В обоих случаях ЭДС искажения E_1 зафиксирована на уровне 3кВ с фазой 0° (совпадает с фазой ЭДС первой гармоники). В первом цикле ЭДС искажения E_2 изменяется от нуля до 3кВ с фазой 0° (E_1 и E_2 синфазны). Во втором – ЭДС искажения E_2 также изменяется от нуля до 3кВ, но с фазой 180° (E_1 и E_2 противофазны). Измерения проводились в ТОП (точки 1, 2, р) и на клеммах потребителя (точки 1', 2', р'). Результаты первого цикла приведены на рис. 2 и в табл. 1. Результаты второго – на рис. 3 и в табл. 2.

Таблица 1. Зависимость коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения от величины E_2 при синфазных E_1 и E_2

Table 1. Dependence of the coefficients of the third current and voltage harmonic on the value E_2 at in-phase E_1 and E_2

E2 В	$K_{3U_{\text{Топ}}}$	K_{3U_1}	K_{3I}	K_{3U_2}	K_{3I}	K_{3U_p}	K_{3I_p}
	%						
3000	1,76	2,42	30,88	2,42	30,88	1,76	1,76
2000	1,47	2,12	31,18	1,91	20,29	1,47	1,47
1500	1,32	1,98	31,32	1,65	15,00	1,32	1,32
1000	1,18	1,83	31,47	1,39	9,71	1,18	1,18
750	1,10	1,76	31,54	1,27	7,06	1,10	1,10
500	1,03	1,68	31,62	1,14	4,41	1,03	1,03
250	0,96	1,61	31,69	1,01	1,76	0,96	0,96
200	0,94	1,59	31,71	0,98	1,24	0,94	0,94
150	0,93	1,58	31,72	0,96	0,71	0,93	0,93
100	0,91	1,56	31,74	0,93	0,18	0,91	0,91
75	0,90	1,56	31,74	0,92	0,09	0,90	0,90
50	0,90	1,55	31,75	0,91	0,35	0,90	0,90
0	0,88	1,54	31,76	0,88	0,88	0,88	0,88

По результатам первого цикла измерений можно заметить существенную разницу в величинах вто-

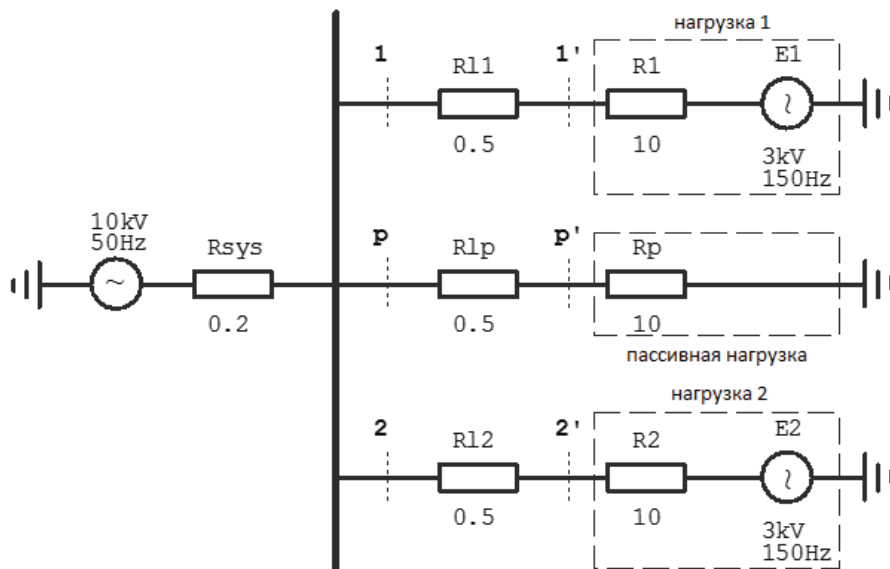


Рис. 1. Упрощенная схема распределительной сети с двумя источниками искажения $E1$ и $E2$, где R_{sys} – сопротивление системы; $R1$, $R2$, R_p – сопротивления нагрузки 1, нагрузки 2 и пассивной нагрузки; $Rl1$, $Rl2$, Rlp – сопротивление линий, питающих нагрузку 1, нагрузку 2 и пассивную нагрузку; $E1$, $E2$ – ЭДС 3-й гармоники, генерируемой в нагрузке 1 и нагрузке 2, соответственно

Fig. 1. Simplified diagram of a distribution network with two distortion sources $E1$ and $E2$, where R_{sys} is the system resistance; $R1$, $R2$, R_p are the resistances of the load 1, load 2 and passive load; $Rl1$, $Rl2$, Rlp are the resistances of the line supplying the load 1, load 2 and passive load; $E1$, $E2$ are the EMF of the third harmonic generated in the load 1 and the load 2, respectively

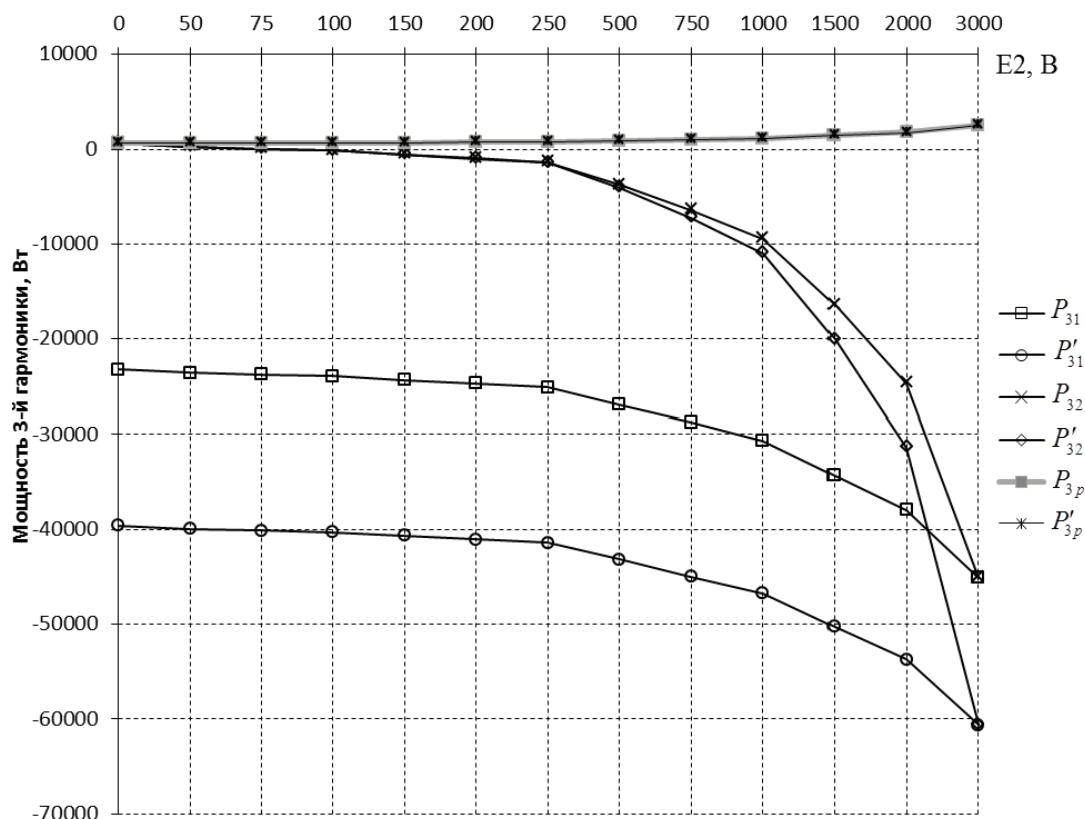


Рис. 2. Зависимость мощности 3-й гармоники от величины $E2$ при синфазных $E1$ и $E2$, где P_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1; P'_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1'; P_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2; P'_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2'; P_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p; P'_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p'

Fig. 2. Dependence of the third harmonic power on value $E2$ at in-phase $E1$ and $E2$, where P_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1; P'_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1'; P_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2; P'_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2'; P_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p; P'_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p'

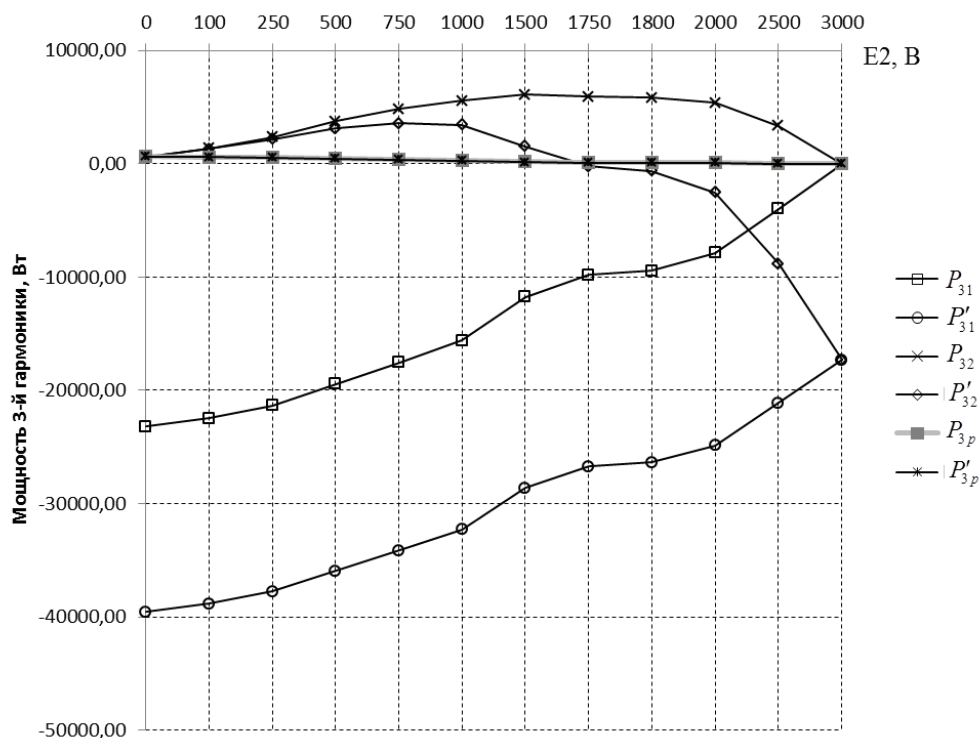


Рис. 3. Зависимость мощности 3-й гармоники от величины E2 при противофазных E1 и E2, где P_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1; P'_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1'; P_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2; P'_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2'; P_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p; P'_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p'

Fig. 3. Dependence of the third harmonic power on the value E2 at antiphase E1 and E2, where P_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1; P'_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1'; P_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2; P'_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2'; P_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p; P'_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p'

ричных мощностей 3-й гармоники, измеренных в ТОП и на клеммах потребителя. Это связано с потерями на сопротивлениях питающих линий. Также стоит обратить внимание на соотношения P_{31}/P_{32} и P'_{31}/P'_{32} . Из графика видно, с уменьшением величины искажающей ЭДС E2 долевое участие искажающей нагрузки 1 по результатам измерений на клеммах потребителя (точки 1' и 2') существенно выше, чем по измерениям в ТОП (точки 1 и 2). В случае синфазных искажающих ЭДС коэффициенты 3-й гармоники напряжения на клеммах искажающих потребителей K_{3U_1} и K_{3U_2} будут всегда выше коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициенты 3-й гармоники тока и напряжения на клеммах пассивной нагрузки (K_{3I_p} , K_{3U_p}) равны коэффициенту 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. По данным табл. 1 можно сделать вывод, что в случае синфазных искажающих ЭДС E1 и E2 признаком наличия источника искажения в нагрузке является превышение коэффициентами 3-й гармоники напряжения на клеммах потребителя K_{3U_1} и K_{3U_2} , значение коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициент 3-й гармоники тока на клеммах искажающего потребителя для случая синфазных искажающих ЭДС E1 и E2 может быть ниже коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП (выделенный фрагмент в табл. 1).

Таблица 2. Зависимость коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения от величины E2 при противофазных E1 и E2

Table 2. Dependence of the coefficients of the third current and voltage harmonic on the value E2 at antiphase E1 and E2

E2 В	$K_{3I_{\text{кон}}}$	K_{3U_1}	K_{3I_1}	K_{3U_2}	K_{3I_2}	K_{3U_p}	K_{3I_p}
	%						
3000	0,00	0,65	32,65	0,65	32,65	0,00	0,00
2500	0,15	0,80	32,50	0,40	27,35	0,15	0,15
2000	0,29	0,95	32,35	0,14	22,06	0,29	0,29
1800	0,35	1,01	32,29	0,04	19,94	0,35	0,35
1750	0,37	1,02	32,28	0,01	19,41	0,37	0,37
1500	0,44	1,09	32,21	0,11	16,76	0,44	0,44
1000	0,59	1,24	32,06	0,37	11,47	0,59	0,59
750	0,66	1,31	31,99	0,50	8,82	0,66	0,66
500	0,74	1,39	31,91	0,63	6,18	0,74	0,74
250	0,81	1,46	31,84	0,75	3,53	0,81	0,81
100	0,85	1,51	31,79	0,83	1,94	0,85	0,85
0	0,88	1,54	31,76	0,88	0,88	0,88	0,88

Случай с противофазными искажающими ЭДС E1 и E2 представляется более интересным. При их равенстве коэффициент 3-й гармоники напряжения в ТОП равен нулю. Соответственно, мощность искажения потребителей при измерениях в ТОП тоже равна нулю. То есть искажающие токи текут от од-

ного искажающего источника к другому, а искажающая мощность отсутствует. Также интересно заметить, что при незначительном уменьшении ЭДС Е2, искажающая нагрузка 2, судя по измерениям в ТОП, превращается в потребителя, притом более «страдающего» от искажения, чем просто пассивная нагрузка. В случае противофазных искажающих ЭДС коэффициенты 3-й гармоники тока искажающих потребителей K_{3I_1} и K_{3I_2} будут выше коэффициента гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициенты 3-й гармоники тока и напряжения на клеммах пассивной нагрузки (K_{3I_p} , K_{3U_p}) равны коэффициенту 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. По данным табл. 2 можно сделать вывод, что в случае противофазных искажающих ЭДС Е1 и Е2 признаком наличия источника искажения в нагрузке является превышение коэффициентами 3-й гармоники тока на клеммах потребителя K_{3I_1} и K_{3I_2} , значение коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициент 3-й гармоники напряжения для случая противофазных искажающих ЭДС Е1 и Е2 на клеммах искажающего потребителя может

быть ниже коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП (выделенный фрагмент в табл. 2).

Выводы

1. Для определения виновника искажения кривой напряжения в ТОП наиболее универсальным является метод на основе измерения величины и знака искажающей мощности.
2. Измерения искажающей мощности в ТОП не позволяют достоверно определить всех виновников искажения из-за одинакового значения напряжения соответствующей гармонической составляющей для всех потребителей.
3. При определении виновника искажения кривой напряжения в ТОП измерение вторичной мощности гармоник необходимо проводить не в точке общего подключения, а в точке передачи энергии, то есть на клеммах потребителя.
4. Требуется подготовка технико-экономического обоснования для установки дополнительного измерительного оборудования в точке передачи электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / ed. by Prof. G. Romero. InTech. 2011. 290 p. URL: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-harmonics-analysis-and-real-measurements-data> (дата обращения: 05.02.2015).
2. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
3. Волошко А.В., Филянин Д.В. Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований // Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вып. 4/2014 (87). – С. 38–43.
4. Manson J., Targosz R. European Power Quality Survey Report. November 2008. URL: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/PQSurvey.pdf> (дата обращения: 12.11.2014).
5. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 18.06.99. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 30 с.
6. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2013. – М: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
7. IEEE Std 1459–2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. March 2010. IEEE Standard 1459. – 40 p.
8. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems // European Transactions on Electric Power. – 1996. – V. 6. – № 6. – P. 401–406.
9. Czarnecki L.S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement // IEEE Trans. Instrum. Measur. – 1990. – V. 39. – № 2. – P. 340–345.
10. Emanuel A. E.: On the Assessment of Harmonic Pollution // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1995. – V. 10. – № 3. – P. 1693–1698.
11. Rens P.J., Swart P.H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification // ETEP. – 2001. – V. 11. – № 5. – P. 317–322.
12. Swart P.H., Case M.J., Van Wyk J.D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks // ETEP. – 1994. – V. 4. – № 6. – P. 485–490.
13. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems / R.S. Herrera, A. Pérez, P. Salmerón, J.R. Vázquez, S.P. Litrán. URL: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (дата обращения: 13.11.2014).
14. Heydt G.T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique // IEEE Trans. On Power Delivery. – 1989. – V. 4. – № 1. – P. 569–576.
15. Beites L.F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). – Cordoba, Spain, 8–10 April, 2014. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (дата обращения: 13.11.2014).
16. Степанов А.С., Маругин В.И. О наблюдаемости распределительных электрических сетей // Энергетика, экология, надежность, безопасность: матер. докладов XVI Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск, 8–10 декабря 2010. – Томск, Изд-во ТПУ, 2010. – С. 46–48.
17. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии // Электричество. – 1992. – № 11. – С. 13–19.
18. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1996. – V. 11. – № 2. – P. 1003–1012.
19. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions / A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V.G. Monopoli, P. Zanchetta // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – № 3. – P. 1284–1290.
20. Сендерович Г.А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений. // Наукові праці Донецького Національного Технічного Університету. – 2011. – № 11 (186). – С. 330–335.

Поступила 10.02.2015 г.

UDC 621.311

ON THE ISSUE OF DISTORTION SOURCE IDENTIFICATION ON THE EXAMPLE OF A SIMPLIFIED MODEL OF ELECTRIC POWER SYSTEM

Anatoly V. Voloshko,

Institute of Energy Saving and Energy Management within National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», 115, Boorshchagovskaya street, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

Daniel V. Filyanin,

Institute of Energy Saving and Energy Management within National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», 115, Boorshchagovskaya street, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: dany@nm.ru

The relevance of the research is caused the changed structure of energy consumption associated with the increase in the proportion of non-linear loads and the need to reliable determination of distortion sources in the distribution network for the effective functioning of the system of penalties and sanctions.

The main aim of the study is to determine the sources of stress curve distortion in the point of common coupling on the example of a simplified model of electric power system.

The methods used in the study. The operating modes of the model are calculated using the Simulink application, included in the software package Matlab 2014a. To build the model the authors used a simulation library SimPowerSystem, which includes mathematical models of individual elements of power equipment. When selecting the model parameters of the distribution network the active resistances that simulate cable line and load, were used to simplify the calculations. To determine the magnitude and sign of harmonic power flux the Fourier transform was applied.

The results. The authors carried out the review of the existing methods for identification of distortion sources in the point of common coupling of the distribution network; their advantages and disadvantages were defined. On the example of a simplified model of electric power system the authors measured the sign and magnitude of the power of distortion sources in the point of common coupling and at the terminals of consumers with non-distortion and distortion loads. According to the results of the measurements the differences in the values of secondary harmonic power in the point of common coupling and at the terminals of consumers were defined. The authors identified some features of the distortion sources presence in the load and proposed a new approach to identify the sources of harmonics by using a harmonic power flux sense method, according to which it is recommended to move the point of measuring of the secondary harmonic power from the point of common coupling to terminals of consumers.

Key words:

Power quality, harmonics, distortion power, total harmonic distortion, distortion source.

REFERENCES

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data. Ed. by Prof. G. Romero. *InTech*. 2011. 290 p. Available at: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-harmonics-analysis-and-real-measurements-data> (accessed 05 February 2015).
2. Kharlov N.N. *Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in power industry]. Tomsk, TPU Publ. House, 2007. 207 p.
3. Voloshko A.V., Filyanin D.V. Vliyanie kachestva elektroenergii na tochnost pokazaniy elektroschetchnikov: obzor issledovaniy [The impact of power quality on the accuracy of meter reading: a review of study]. *Transactions of Kremenchuk Mikhailo Ostrohradskiy National University*, 2014, vol. 4 (87), pp. 38–43.
4. Manson J., Targosz R. *European Power Quality Survey Report*. November 2008. Available at: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/PQSurvey.pdf> (accessed 12 November 2014).
5. *GOST 13109–97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh ekektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109–97. Quality standards of electrical energy in power systems for general use]. Minsk, 1999. 30 p.
6. *GOST R 54149–2010. Elektricheskaya energiya. Sovместimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh ekektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109–97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2012. 16 p.
7. *IEEE Std 1459–2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions*. March 2010. IEEE Standard 1459. 40 p.
8. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems. *European Transactions on Electric Power*, 1996, vol. 6, no. 6, pp. 401–406.
9. Czarnecki L.S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement. *IEEE Trans. Instrum. Measur.*, 1990, vol. 39, no. 2, pp. 340–345.
10. Emanuel A. E.: On the Assessment of Harmonic Pollution. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 1693–1698.
11. Rens P.J., Swart P.H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification. *ETEP*, 2001, vol. 11, no. 5, pp. 317–322.
12. Swart P.H., Case M.J., Van Wyk J.D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks. *ETEP*, 1994, vol. 4, no. 6, pp. 485–490.
13. Herrera R.S., Pérez A., Salmerón P., Vázquez J.R., Litrán S.P. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems. Available at: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (accessed 13 November 2014).
14. Heydt G.T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. *IEEE Trans. On Power Delivery*, 1989, vol. 4, no. 1, pp. 569–576.
15. Beites L.F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical net-

- works. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*. Cordoba, Spain, 8–10 April, 2014. Available at: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (accessed 13 November 2014).
16. Stepanov A.S., Marugin V.I. O nablyudaemosti raspredelitelnykh elektricheskikh setey [On the observability of electricity distribution networks]. *Energetika, ekologiya, nadezhnost, bezopasnost: materialy XVI vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering, ecology, reliability, safety: Proc. of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tomsk, 2010. pp. 46–48.
 17. Zykin F.A. Opredelenie stepeni uchastiya nagruzok v snizhenii kachestva elektricheskoy energii [Determining of impact consumers in the power quality distortion]. *Electrichestvo*, 1992, vol. 11, pp. 13–19.
 18. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1996, vol. 11, no. 2, pp. 1003–1012.
 19. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V.G., Zanchetta P. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 3, pp. 1284–1290.
 20. Senderovich G.A. Opredelenie dolevogo uchastiya subektov v otvetstvennosti za narushenie simmetrii napryazheniy [Determination of share participation of subjects in responsible in making unbalanced condition]. *Naukovi pratsi Donetskogo Natsionalnogo Tekhnichnogo Universytetu*, 2011, vol. 11 (186), pp. 330–335.

Received: 10 February 2015.

УДК 534.143

УПРАВЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ ЕМКОСТНОГО ПАРАМЕТРА

Томилин Александр Константинович,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: aktomilin@gmail.com

Прокопенко Елена Васильевна,

преподаватель кафедры общепрофессиональных дисциплин Факультета машиностроения и транспорта РГП на ПХВ «Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева», Республика Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69. E-mail: prokopenko.1982@mail.ru

Актуальность исследования. Область использования мехатронных систем постоянно расширяется. В зависимости от их назначения требуется управлять различными типами движения при помощи соответствующих нейронных сетей. Разработка новых типов актуаторов и сенсоров является актуальной научной проблемой.

Цель работы заключается в изучении динамики тороидального актуатора на упругой подвеске с электроемкостью в качестве управляющего параметра.

Методы исследования. Составлены и исследованы дифференциальные уравнения движения для свободных и вынужденных колебаний системы. Теоретическое изучение опирается на эксперимент, в котором наблюдается продольное движение тороида с током в поле магнитной пары, анализ движения производится на основе дифференциальных уравнений.

Результаты. Теоретически описаны собственные и вынужденные колебания тороидального актуатора в потенциальном магнитном поле при наличии конденсатора в электрической цепи. Рассмотрен частный случай, когда потенциальное магнитное поле является стационарным и однородным. Определена магнитная сила, действующая на тороид с током в потенциальном магнитном поле при наличии конденсатора во внешней цепи. Установлено, что эта сила пропорциональна ускорению тороида и направлена вдоль его оси.

Вывод. Емкостный параметр системы приводит к уменьшению квазиинерционного коэффициента. Из дифференциального уравнения собственных колебаний системы определяется значение собственной частоты при электромагнитном воздействии. В частном примере произведено сравнение этой частоты с частотой в отсутствие магнитной силы. Сделан вывод о возможности электромагнитной подстройки собственной частоты системы регулировкой емкостного параметра. Из дифференциального уравнения вынужденных колебаний получена расчетная формула для определения резонансной электроемкости. Результаты теоретического исследования можно использовать для создания мехатронных систем с тороидальным актуатором. Управление собственными частотами таких систем удобно производить регулировкой емкостного параметра, включенного в электрическую цепь.

Ключевые слова:

Колебания упругих систем, магнитная сила, тороид, электроемкость, частота колебаний, резонанс.

Введение

При проектировании мехатронных систем часто возникает проблема активного контроля вибрационных процессов [1–3]. При этом решается вопрос о выборе типа актуатора и соответствующего управляющего параметра в зависимости от характера движения рабочего элемента [4–14]. В настоящей работе предлагается новый тип актуатора с электроемкостью в качестве управляющего параметра.

Авторами произведен эксперимент с целью наблюдения движения тороидальной катушки в поле магнитной пары (рис. 1). Цилиндрический тороид имел размеры: внешний радиус $R_i=10$ мм, внутренний радиус $r_i=5$ мм, высота $h=10$ мм. Двухслойная бифилярная обмотка (с целью компенсации «набегающего» витка) имела 30 витков из медного провода диаметром 1 мм. Провод намотан на пластиковый полый цилиндр. Тороид подвешивался над линией соединения двух плоских магнитов (магнитная пара), каждый из которых имел размеры: $10 \times 20 \times 50$ мм. При пропускании по-

стоянного тока силой 2 А по обмотке тороида происходило его движение вдоль собственной оси симметрии. В случае переменного низкочастотного тока наблюдались продольные колебания тороида. За счет изменения частоты тока такую систему можно настроить в резонанс.

Теоретическое описание и некоторые возможные приложения эффекта, наблюдаемого в эксперименте, приведены в работах [15–18].

На рис. 2 представлена фотография магнитного поля, созданного парой магнитов. На торцах магнитной пары (вверху и внизу) образуются «пустые» области. Экспериментально установлено, что на тороид, помещенный в одну из этих областей, действует сила, совпадающая по направлению с токами, текущими по его внутренним виткам. В такой же области на другом торце пары тороид при том же направлении тока испытывает действие силы противоположного направления. Следовательно, в «пустых» областях создается магнитное поле, обладающее потенциальными свойствами.

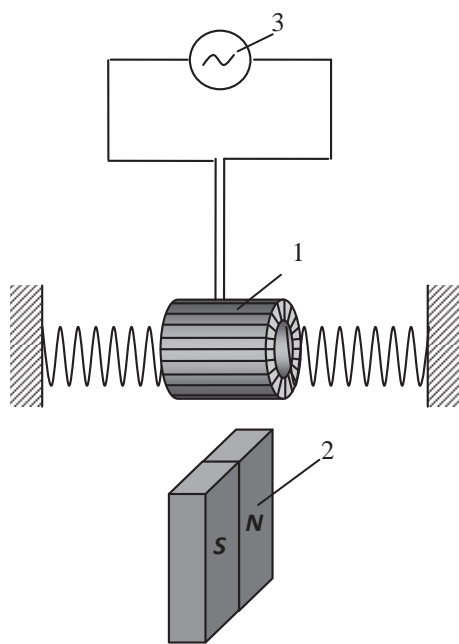


Рис. 1. Эксперимент с тороидом: 1) тороид; 2) магнитная пара; 3) источник переменного тока

Fig. 1. Experiment with a toroid: 1) toroid; 2) magnetic couple; 3) ac source

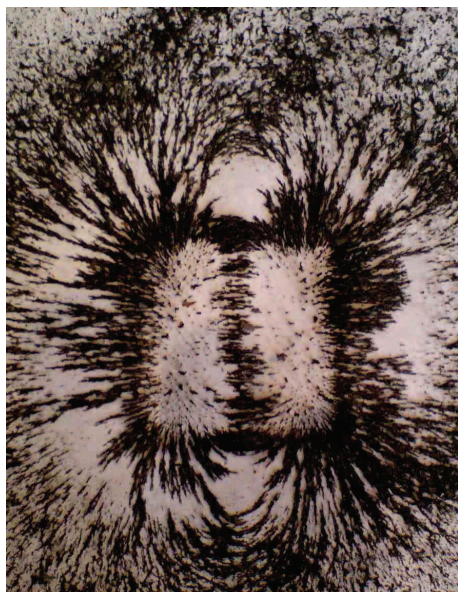


Рис. 2. Конфигурация магнитного поля, созданного парой плоских прямоугольных магнитов

Fig. 2. Configuration of magnetic field generated by a pair of flat rectangular magnets

Индукция этой компоненты магнитного поля описывается скалярной функцией, поэтому иногда используется термин «скалярное магнитное поле» (СМП) [15–18]. Знаки этой функции на торцах магнитной пары различны: при совпадении направления магнитной силы с направлением внутренних токов берется знак «плюс», в противном слу-

чае – «минус». Следовательно, в качестве индикатора СМП можно использовать тороид, размеры которого не превышают размеров области СМП.

Теория, описанная в монографии [15], позволяет рассчитать силу, действующую на тороид с током, помещенный во внешнее СМП. Эта сила направлена вдоль оси тороида, что и подтверждается экспериментом.

Обнаруженный эффект можно использовать для создания тороидального актуатора, генерирующего продольные колебания упругой системы. При этом имеется возможность бесконтактной настройки системы в резонанс.

Результаты исследования и обсуждение

Исследуем процесс собственных колебаний тороида в потенциальном (скалярном) магнитном поле. На рис. 3 показана электромеханическая система, состоящая из двух пружин и тороидальной катушки. Тороид может совершать свободные колебания вдоль горизонтальной оси z . В электрическую цепь, замыкающую обмотку тороида, включен конденсатор емкости C . Тороид находится в неоднородном стационарном СМП положительного знака с индукцией $B^*(z)$.

Заметим, что объяснить наблюдаемый в эксперименте эффект при помощи обычной силы Ампера не представляется возможным по следующим причинам:

- 1) тороид расположен в «пустой» области, где обычное (соленоидальное) магнитное поле практически не обнаруживается при помощи чувствительного тесламетра;
- 2) тороидальная катушка имеет двухслойную обмотку, компенсирующую «набегающий» виток;
- 3) подводящие проводники расположены практически на одной линии, с целью компенсации сил Ампера, действующих на них.

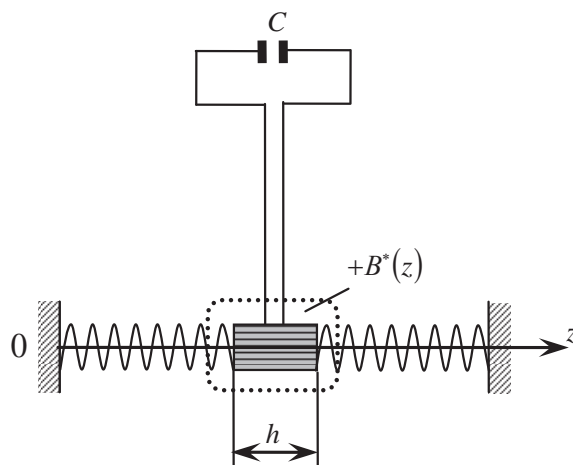


Рис. 3. Схема электромеханической системы с емкостным параметром

Fig. 3. Circuit of electromechanical system with a capacity parameter

Закон безвихревой электромагнитной индукции [15] записывается в виде:

$$\varepsilon^* = \frac{d\Phi^*}{dt},$$

где Φ^* – аналог потока магнитной индукции.

Пусть закон движения центра тороида $z(t)$, тогда:

$$d\Phi^* = B^*(z)z(t)dz.$$

Зададим начальные условия движения: $z(0)=0$, $\dot{z}(0)=V_0$.

Так как витки тороида соединены последовательно, в нем индуцируется напряжение:

$$U_C = wV(t) \int_{z_1}^{z_2} B^*(z)dz, \quad (1)$$

где w – число витков обмотки; $V(t)=\dot{z}$ – переносная скорость тороида; $z_1=z-h/2$, $z_2=z+h/2$ – координаты его торцов; h – высота.

Рассмотрим упрощенный случай, когда скалярное магнитное поле является стационарным и однородным:

$$B^* = \text{const}. \quad (2)$$

В этом случае (1) запишется в виде:

$$U_C = wV(t)B^*h. \quad (3)$$

Из (3) следует, что индуцированное на обкладках конденсатора напряжение U_C имеет максимальное значение при $z=0$ (при максимальной скорости).

Заряд конденсатора и напряжение связаны соотношением:

$$Q = U_C C, \quad (4)$$

где C – емкость конденсатора.

Определим силу индуцированного тока при условии (2) с учетом (4):

$$J(t) = \frac{dQ}{dt} = wCB^*h\dot{z}. \quad (5)$$

Запишем условия [19], при которых можно пренебречь активным сопротивлением цепи и индуктивным сопротивлением тороидальной катушки:

$$\frac{1}{\omega C} \gg R, \quad \frac{1}{\omega C} \gg \omega L_0, \quad (6)$$

где R – активное сопротивление; L_0 – индуктивность тороидальной катушки.

Зададим параметры тороидальной катушки и определим ее активное сопротивление с учетом подводящих проводников. Примем внешний радиус $R_i=10$ мм, внутренний радиус $r_i=5$ мм, высота тороида $h=10$ мм, число витков $w=30$, диаметр сечения медного провода 1 мм.

При этом активное сопротивление обмотки тороида:

$$R = \rho \frac{l_w}{S} = 0,02 \text{ Ом},$$

где l_w – длина провода обмотки тороида и подводящих проводников.

Рассчитаем собственную индуктивность тороида L_0 :

$$L_0 = \frac{\mu_0 w^2 S}{2\pi r}, \quad (7)$$

где $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость; w – число витков; S – площадь поперечного сечения тора; r – средний радиус тороида.

Подставим численные данные в (7) и получим значение:

$$L_0 = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Запишем выражение для продольной магнитной силы, возникающей в тороиде и действующей вдоль его оси [15]:

$$F^*(t) = wJ(t) \int_{z_1}^{z_2} B^*(z)dz. \quad (8)$$

Запишем (8) с учетом (5) при условии (2):

$$F^*(t) = w^2 CB^{*2} h \dot{z}. \quad (9)$$

Составим дифференциальное уравнение, описывающее движение тороида во внешнем стационарном однородном СМП положительного знака при наличии конденсатора в замыкающей цепи [20]:

$$(m - w^2 CB^{*2} h) \ddot{z} + v \dot{z} + cz = 0, \quad (10)$$

где m – масса тороида; v – коэффициент сопротивления; c – жесткость подвеса.

Электромагнитное воздействие (9) привело к уменьшению квазиинерционного коэффициента в дифференциальном уравнении (10). Обозначим его:

$$k = m - w^2 CB^{*2} h. \quad (11)$$

Понятно, что колебания происходят только при положительном значении квазиинерционного коэффициента k .

Рассмотрим численный пример. Зададим параметры системы. Масса тороида $m=0,0254$ кг, индукция СМП $B^*=1$ Тл, емкость конденсатора $C=0,4 \cdot 10^{-3}$ Ф, коэффициент сопротивления $v=0,1$ кг/с, жесткость подвеса $c=4$ Н/м.

Квазиинерционный коэффициент (11) при этом имеет значение:

$$k = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Частота собственных колебаний тороида без электромагнитного воздействия:

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m} - b^2} = 22,81 \text{ с}^{-1}, \quad (12)$$

где $b = \frac{v}{2m}$ – фактор затухания.

Определим частоту собственных колебаний с учетом электромагнитного воздействия:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{c}{k} - b'^2} = 30,99 \text{ с}^{-1}, \quad (13)$$

где $b' = \frac{v}{2k}$ – фактор затухания с учетом электромагнитного воздействия.

Сравнивая (12) и (13), определим изменение частоты собственных колебаний за счет электромагнитного воздействия:

$$\Delta = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega} \cdot 100 \% = 35,86 \%.$$

С учетом полученных значений нетрудно проверить выполнимость условий (6).

Сделаем вывод: используя управляющий емкостный параметр можно в широких пределах изменять собственную частоту продольных колебаний тороида во внешнем СМП.

Рассмотрим вынужденные колебания тороида. Добавим внешнюю продольную вынуждающую силу, приложенную к тороиду:

$$F = F_0 \sin pt, \quad (14)$$

где p – частота вынуждающей силы; F_0 – ее амплитуда.

Составим дифференциальное уравнение продольных колебаний тороида в СМП с учетом вынуждающей силы (14) [20]:

$$\ddot{z} + \frac{v}{k} \dot{z} + \frac{c}{k} z = \frac{F_0 \sin pt}{k}. \quad (15)$$

Установившиеся вынужденные колебания совершаются с амплитудой:

$$A = \frac{F_0}{k \sqrt{\left(\frac{c}{k} - p^2\right)^2 + \frac{v^2}{k^2} p^2}}.$$

В случае резонанса:

$$\left(\frac{c}{k} - p^2\right)^2 + \frac{v^2}{k^2} p^2 = \min.$$

Из этого условия получим выражение для резонансной частоты, соответствующей (15):

$$p_r = \sqrt{\frac{c}{k} + \frac{v^2}{2k^2}}. \quad (16)$$

Чтобы настроить систему в резонанс, нужно подобрать соответствующую емкость. Из (16) получим квадратное уравнение:

$$k^2 - \frac{c}{p_r^2} k - \frac{v^2}{2p_r^2} = 0. \quad (17)$$

Уравнение (17) имеет два корня. Отрицательный корень не имеет физического смысла. Положительный корень позволяет записать соотношение, связывающее квазиинерционный коэффициент с резонансной частотой:

$$k = \frac{c}{2p_r^2} + \sqrt{\frac{c^2}{4p_r^4} + \frac{v^2}{2p_r^2}}. \quad (18)$$

Из (11) и (18) получим формулу для расчета резонансной емкости:

$$C_r = \frac{m - \frac{c}{2p_r^2} - \sqrt{\frac{c^2}{4p_r^4} + \frac{v^2}{2p_r^2}}}{w^2 B^{*2} h}.$$

Выбор резонансной частоты ограничен условием:

$$m > \frac{c}{2p_r^2} + \sqrt{\frac{c^2}{4p_r^4} + \frac{v^2}{2p_r^2}}.$$

Рассмотрим пример. При частоте и всех заданных выше параметрах системы резонанс наступает при значении емкости:

$$C_r = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}.$$

Условия (6) при этом выполняются.

Заключение

Сформулируем основные результаты и выводы, полученные в работе.

1. Теоретически описаны собственные и вынужденные колебания тороидального актуатора в однородном и стационарном потенциальном магнитном поле при наличии конденсатора в электрической цепи.
2. Исследован линейный резонанс, определено значение резонансной емкости.
3. Результаты теоретического исследования можно использовать для создания мехатронных систем с тороидальным актуатором. Управление собственными частотами таких систем удобно производить регулировкой емкостного параметра, включенного в электрическую цепь.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-31-50037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 320 с.
2. Овчинников И.Е. Электромеханические и мехатронные системы. Ч. 1. – СПб.: СПбГУИТМО, 2008. – 121 с.
3. Karnopp D.C., Margolis D.L., Rosenberg R.C. System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems. 5th ed. – New York: Wiley, 2012. – 648 p.
4. Lyshevski S.E. Precision control of mechatronic systems with electromagnetically-steered moving masses // Int. J. Advanced Mechatronic Systems. – 2013. – V. 5. – № 5. – P. 1–9.
5. Study on Application of Two New Types of Piezoelectric Actuators to the Vibration Control / W. Wang et al. // Piezoelectric & Acousto Optics. – 2010. – V. 1. – 223 p.
6. Frequency domain identification for active vibration control of flexible structures / Y. Wang et al. // Control and Automation 2005. ICCA'05: International Conference on IEEE. – Budapest, 2005. – V. 2. – pp. 1149–1153.
7. Lu Xiaobo, Tao Yungang, He Yanwei. Active vibration control of a cantilever beam using piezoelectric sensors and actuators // Trans. Nanjing Univ. Aeron. and Astron. – 1997. – V. 14. – № 3. – P. 67–72.

8. Mizuno T., Araki K. Active Dynamic Vibration Absorber with Automatic Frequency-Tracking Performance // JSME International Journal Series C. – 1998. – V. 41. – № 3. – P. 378–383.
9. Yang S.M., Jeng C.A. Structural vibration suppression by concurrent piezoelectric sensor and actuator // Smart Mater. and Struct. – 1996. – V. 5. – № 6. – P. 806–813.
10. Pietrzakowski M. Active damping of laminated plates by skewed piezoelectric patches // Journal of theoretical and applied Mechanics. – 2001. – V. 2. – № 39. – P. 377–393.
11. Smyser C.P., Chandrachehara K. Robust vibration control of composite beams using piezoelectric devices and neural networks // Smart Mat. and Struct. – 1997. – V. 6. – № 2. – P. 178–189.
12. Sun Dongchang, Wang Dajun, Xu Z.L. Distributed piezoelectric segment method for vibration control of smart beams // AIAA Journal. – 1997. – V. 35. – № 3. – P. 583–584.
13. Preumont A. Vibration control of active structures: an introduction. – Berlin, Heidelberg, New York, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer, 2011. – 480 p.
14. Mohamed et al. Intelligent hybrid Active Force Control in identification of a nonlinear MIMO system/T.L.T.// Research and Development (SCOReD): IEEE Student Conference on Research and Development. – Pulau Pinang, Malaysia, 2012. – P. 114–119.
15. Томилилин А.К. Основы обобщенной электродинамики // Математика в ВУЗе. Интернет-журнал СПбГТУ. – 2009. – № 17. URL: http://www.spbstu.ru/publications/m_v/N_017/frame_17.html (дата обращения: 30.10.2014).
16. Tomilin A.K., Prokopenko E.V. Non-Destructive Testing of Rods Using a Potential Component of a Magnetic Field // World Journal of Mechanics. – 2014. – V. 4. – № 2. – P. 37–43.
17. Томилилин А.К., Прокопенко Е.В. Продольные колебания упругого электропроводного стержня в неоднородном магнитном поле // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2013. – № 1 (21). – С. 104–111.
18. Томилилин А.К., Прокопенко Е.В. Ультразвуковой генератор с продольным электромагнитным возбуждением // Изв. вузов. Физика. – 2012. – № 6/2. – С. 248–251.
19. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.
20. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высш. Школа, 1980. – 408 с.

Поступила 31.10.2014 г.

UDC 534.143

CONTROL OF MECHATRONIC SYSTEM LONGITUDINAL VIBRATIONS USING CAPACITIVE PARAMETER

Aleksandr K. Tomilin,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: aktomilin@gmail.com

Elena V. Prokopenko,

D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university, 69, Protozanov street, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan. E-mail: prokopenko.1982@mail.ru

Research relevance. The area of mechatronic systems use is constantly expanding. Depending on their purposes the control of different modes of motion using appropriate neural networks is needed. The development of new types of actuators and sensors is a vital scientific challenge.

The research is aimed at the dynamics study of an elastically suspended toroidal actuator with electric capacity as a control parameter.

Research methods. The authors have obtained and solved differential equations of motion for free and forced vibrations of the system. Theoretical study is based on the experiment in which the longitudinal motion of the toroid with current in a magnetic field pair is observed, motion analysis is based on the differential equation.

Results. The paper describes theoretically free and forced vibrations of the toroidal actuator in a potential magnetic field in the presence of a capacitor in an electric circuit. The authors consider the special case when a potential magnetic field is stationary and homogeneous and determine the magnetic force acting on the toroid with current in a potential magnetic field in the presence of the capacitor in the external circuit. It was found that this force is proportional to the acceleration of the toroid and it is directed along the axis.

Conclusion. The capacitive parameter reduces the system quasi-inertial coefficient. From the differential equations of natural vibrations of the system, the value of the natural frequency at the electromagnetic influence is determined. In the particular example the compared this frequency with the frequency in the absence of magnetic forces. The conclusion was made on possibility of adjusting the natural frequency of the electromagnetic system using capacitive parameter. From the differential equation of the forced oscillations the authors obtained the formula for calculating the resonant electric capacity. The results of theoretical research can be used to develop mechatronic systems with a toroidal actuator. The eigen frequencies of such systems can be conveniently controlled by adjusting the capacitance parameter included in the circuit.

Key words:

Vibrations of elastic systems, magnetic force, toroid, electrical capacitance, oscillation frequency, resonance.

The research was supported by the grant of RFBR no. 14–31–50037.

REFERENCES

1. Karnaukhov N.F. *Electromekhanicheckie i mekhatronnye sistemy* [Electromechanical and mechatronic systems]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2006. 320 p.
2. Ovchinnikov I.E. *Electromekhanicheckie i mekhatronnye sistemy* [Electromechanical and mechatronic systems]. St. Petersburg, 2008. P. 1, 121 p.
3. Karnopp D. C., Margolis D. L., Rosenberg R. C. *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*. 5th ed. New York, Wiley, 2012. 648 p.
4. Lyshevski S.E. Precision control of mechatronic systems with electromagnetically-steered moving masses. *Int. J. Advanced Mechatronic Systems*, 2013, vol. 5, no. 5, pp. 1–9.
5. Wang W. Study on Application of Two New Types of Piezoelectric Actuators to the Vibration Control. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010, vol. 1, 223 p.
6. Wang Y. Frequency domain identification for active vibration control of flexible structures. *Control and Automation*, 2005. IC-CA'05. *International Conference*. – IEEE. Budapest, 2005, vol. 2, pp. 1149–1153.
7. Lu Xiaobo, Tao Yungang, He Yanwei. Active vibration control of a cantilever beam using piezoelectric sensors and actuators. *Trans. Nanjing Univ. Aeron. and Astron.*, 1997, vol. 14, no. 3, pp. 67–72.
8. Mizuno T., Araki K. Active Dynamic Vibration Absorber with Automatic Frequency-Tracking Performance. *JSME International Journal Series C*, 1998, vol. 41, no. 3, pp. 378–383.
9. Yang S.M., Jeng C.A. Structural vibration suppression by concurrent piezoelectric sensor and actuator. *Smart Mater. and Struct.*, 1996, vol. 5, no. 6, pp. 806–813.
10. Pietrzakowski M. Active damping of laminated plates by skewed piezoelectric patches. *Journal of theoretical and applied Mechanics*, 2001, vol. 2, no. 39, pp. 377–393.
11. Smyser C.P., Chandrachekhara K. Robust vibration control of composite beams using piezoelectric devices and neural networks. *Smart Mat. and Struct.*, 1997, vol. 6, no. 2, pp. 178–189.
12. Sun Dongchang, Wang Dajun, Xu Z. L. Distributed piezoelectric segment method for vibration control of smart beams. *AIAA Journal*, 1997, vol. 35, no. 3, pp. 583–584.
13. Preumont A. *Vibration control of active structures: an introduction*. Berlin, Heidelberg, New York, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo, Springer, 2011. 480 p.
14. Mohamed T.L.T. Intelligent hybrid Active Force Control in identification of a nonlinear MIMO system. *Research and Development (SCORED): IEEE Student Conference on Research and Development*. Pulau Pinang, Malaysia, 2012. pp. 114–119.
15. Tomilin A.K. Osnovy obobshchennoy elektrodinamiki [Fundamentals of generalized electrodynamics]. *Matematika v Vuze*, 2009, no. 17, 129 p. Available at: http://www.spbstu.ru/publications/m_v/N_017/frame_17.html (accessed 30 October 2014).
16. Tomilin A.K., Prokopenko E.V. Non-Destructive Testing of Rods Using a Potential Component of a Magnetic Field. *World Journal of Mechanics*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 37–43.
17. Tomilin A.K., Prokopenko E.V. Longitudinal oscillations of a resilient electroconductive core in an inhomogeneous magnetic field. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Mat. Mekh.*, 2013, no. 1 (21), pp. 104–111.
18. Tomilin A.K., Prokopenko E.V. Ultrazvukovoy generator s prodolnym elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ultrasonic generator with longitudinal electromagnetic excitation]. *Russian Physics Journal*, 2012, no. 6/2, pp. 248–251.
19. Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 616 p.
20. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical vibrations]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1980. 408 p.

Received: 31 October 2014.

УДК 621.52+511.52

МЕТОД РЕШЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ

Симонян Саргис Оганесович,

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информационных технологий
и автоматизации Национального политехнического университета
Армении, Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.
E-mail: ssimonyan@seua.am

Паповян Рубен Артурович,

аспирант кафедры информационных технологий и автоматизации
Национального политехнического университета Армении, Республика
Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105. E-mail: ruben.papovyan@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки нового эффективного метода определения непрерывных решений однопараметрических линейных матричных уравнений, достаточно часто встречающихся в различных областях науки и техники, таких как идентификация параметров электротехнических (вероятно электромеханических) преобразователей энергии, оптимизация параметров электрических сетей, регистрация и обработка измерений скважинной геофизики и др.

Цель исследования: разработка простого конструктивного численно-аналитического метода определения решений отмеченного класса задач, легко реализуемого средствами современных информационных технологий.

Методы исследования. Для решения рассматриваемых задач в работе использованы методы матричной линейной алгебры, методы теории матриц, а также прямые и обратные дифференциальные преобразования Г.Е. Пухова, отличающиеся от общеизвестных интегральных преобразований достаточно положительными характеристиками – операцией дифференцирования вместо операции интегрирования (прямое преобразование) и операцией суммирования вместо операции интегрирования (обратное преобразование).

Результаты. Предложен конструктивный численно-аналитический метод решения однопараметрических линейных матричных уравнений применением дифференциальных преобразований. При этом решение исходной непрерывной задачи фактически сводится к решению рекуррентной цепочки некоторых линейных систем алгебраических уравнений с числовой инвариантной гиперматрицей и гипервекторами (составными векторами) свободных членов правых частей, при которых определяются матричные дискреты решения исходной задачи. Далее на основе некоторого восстанавливающего соотношения (обратных дифференциальных преобразований) определяется непрерывное решение исходной задачи. Рассмотрен модельный пример, при решении которого предложенным численно-аналитическим методом получено точное маклореновское аналитическое решение, подтверждающее простоту и высокую вычислительную эффективность метода.

Ключевые слова:

Геоинформационные системы, однопараметрические линейные матричные уравнения, дифференциальные преобразования, рекуррентная цепочка линейных систем алгебраических уравнений, матричные дискреты, непрерывное решение, модельный пример.

Введение

В теории матриц и её различных приложениях, в частности, в задачах управления и автоматического регулирования [1–4] и многих других областях научных исследований, достаточно часто встречаются различные матричные уравнения – как числовые, так и параметрические. Если решению числовых матричных уравнений посвящено большое количество публикаций, в частности [5–12], то в области методов решения однопараметрических матричных уравнений замечается значительное отставание. Аналогичная картина имеет место как в числовых, так и в однопараметрических задачах, в которых широко используются обычные и обобщённые обратные матрицы, в частности, в задачах различных геоинформационных систем [13–17]. Здесь также, если определению числовых обычных и обобщённых обратных матриц посвящено множество работ, в частности [8, 10, 18–21], то в области методов определения однопараметрических обычных и обобщённых обратных

матриц также замечается значительное отставание. В одной из таких немногих работ (см., например, [22]) для нахождения однопараметрических обычных и обобщённых обратных матриц были использованы дифференциальные преобразования Г.Е. Пухова [23–27].

При решении матричных уравнений особое место занимают методы, оперирующие различными алгебраическими подходами и широко использующие матричные преобразования. В настоящей работе предлагается метод решения однопараметрических линейных матричных уравнений, также основанный на дифференциальных преобразованиях, и также оперирующий алгебраическим подходом.

Математический аппарат

Рассмотрим общее однопараметрическое линейное матричное уравнение

$$\sum_{i=1}^p A_i(t)X(t)B_i(t) = C(t), \quad (1)$$

где $A_l(t)$, $l=\overline{1,p}$ – матрицы порядка m ; $B_l(t)$, $l=\overline{1,p}$ – матрицы порядка n ; $C(t)$ – матрица с размерами $m \times n$; $X(t)$ – неизвестная матрица также с размерами $m \times n$, подлежащая определению:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_{11}(t) & \cdots & x_{1n}(t) \\ x_{21}(t) & \cdots & x_{2n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}(t) & \cdots & x_{mn}(t) \end{bmatrix} = (x_{ij}(t)),$$

$$i = \overline{1,m}, \quad j = \overline{1,n}. \quad (2)$$

Предположим, что для матриц $A_l(t)$, $B_l(t)$, $l=\overline{1,p}$; $C(t)$ и $X(t)$ с аналитическими элементами имеют место дифференциальные преобразования [23–27]

$$A_l(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{dA_l^k(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underline{\quad}$$

$$\underline{\quad} A_l(t) = \chi_1(t, t_v, H, A_l(K), K = \overline{0, \infty}), \quad l = \overline{1, p}, \quad (3)$$

$$B_l(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{dB_l^k(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underline{\quad}$$

$$\underline{\quad} B_l(t) = \chi_2(t, t_v, H, B_l(K), K = \overline{0, \infty}), \quad l = \overline{1, p}, \quad (4)$$

$$C(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{dC^k(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underline{\quad}$$

$$\underline{\quad} C(t) = \chi_3(t, t_v, H, C(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (5)$$

$$X(K) = \frac{H^k}{K!} \cdot \frac{dX^k(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underline{\quad}$$

$$\underline{\quad} X(t) = \chi_4(t, t_v, H, X(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (6)$$

где $A_l(K)$, $l=\overline{1,p}$ – матричные дискреты матриц $A_l(t)$, $l=\overline{1,p}$; $B_l(K)$, $l=\overline{1,p}$ – матричные дискреты матриц $B_l(t)$, $l=\overline{1,p}$; $C(K)$ – матричные дискреты матрицы $C(t)$; $X(K)$ – матричные дискреты матрицы $X(t)$; $K = \overline{0, \infty}$ – целочисленный аргумент; H – масштабный коэффициент; t_v – центр аппроксимации; символ $\underline{\quad}$ – знак перехода из области оригиналов в область дифференциальных изображений и наоборот; $\chi_i(\bullet) - \chi_i(\bullet)$ – некоторые аппроксимирующие функции, восстанавливающие оригиналы $A_l(t)$, $B_l(t)$, $l=\overline{1,p}$; $C(t)$ и $X(t)$ соответственно.

Теперь, с учетом (3)–(6), в соответствии с правилами алгебры дифференциальных преобразований ([23, С. 72, формула (4.7)]) на основе использования матричного уравнения (1) при переводе его из области оригиналов в область дифференциальных изображений будем иметь соотношение

$$\sum_{l=1}^p \left(\sum_{u=0}^k A_l(K-U) \sum_{v=0}^u X(V) B_l(U-V) \right) = C(K),$$

$$K = \overline{0, \infty}. \quad (7)$$

Тогда с учетом представления (7) получим:
при $K=0$:

$$\sum_{l=1}^p A_l(0) X(0) B_l(0) = C(0)$$

или

$$A_1(0) X(0) B_1(0) + A_2(0) X(0) B_2(0) + \cdots + A_p(0) X(0) B_p(0) = C(0), \quad (8)$$

где $A_l(0)$, $B_l(0)$, $l=\overline{1,p}$ и $X(0)$, $C(0)$ – нулевые по номеру матричные дискреты. Для определения из последнего матричного уравнения неизвестного матричного дискрета $X(0)$ воспользуемся подходом, представленным в [8, 10]. В соответствии с ним матричное уравнение (8) эквивалентно системе линейных алгебраических уравнений

$$G(0,0)_{mn \times mn} \hat{X}(0)_{mn \times 1} = \hat{C}(0)_{mn \times 1}, \quad (9)$$

где составные векторы

$$\hat{X}(0) = (x_{11}(0), \dots, x_{1n}(0); x_{21}(0), \dots, x_{2n}(0); \dots; x_{m1}(0), \dots, x_{mn}(0))^T, \quad (10)$$

$$\hat{C}(0) = (c_{11}(0), \dots, c_{1n}(0); c_{21}(0), \dots, c_{2n}(0); \dots; c_{m1}(0), \dots, c_{mn}(0))^T, \quad (11)$$

а гиперматрица

$$G(0,0) = \sum_{l=1}^p (A_l(0) \otimes B_l^T(0)) \quad (12)$$

является суммой прямых (кронекеровых) произведений матриц $A_l(0)$ и $B_l^T(0)$, $l=\overline{1,p}$. Тогда, с учетом (10)–(12) и теоремы 8.4.1 из [10, С. 239] при условии $\text{rang}G(0,0)=mn$ решение системы (9) будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{X}(0) = G^{-1}(0,0) \hat{C}(0); \quad (13)$$

при $K=1$:

$$A_1(1) X(0) B_1(0) + A_1(0) X(1) B_1(0) + A_1(0) X(0) B_1(1) + A_2(1) X(0) B_2(0) + A_2(0) X(1) B_2(0) + A_2(0) X(0) B_2(1) + \cdots + A_p(1) X(0) B_p(0) + A_p(0) X(1) B_p(0) + A_p(0) X(0) B_p(1) = C(1)$$

или

$$\sum_{l=1}^p A_l(1) X(0) B_l(0) + \sum_{l=1}^p A_l(0) X(1) B_l(0) + \sum_{l=1}^p A_l(0) X(0) B_l(1) = C(1). \quad (14)$$

Тогда, по аналогии (8) из (14) имеем:

$$G(1,0) \hat{X}(0) + G(0,0) \hat{X}(1) + G(0,1) \hat{X}(0) = \hat{C}(1), \quad (15)$$

где составные векторы:

$$\hat{X}(1) = (x_{11}(1), \dots, x_{1n}(1); x_{21}(1), \dots, x_{2n}(1); \dots; x_{m1}(1), \dots, x_{mn}(1))^T, \quad (16)$$

$$\hat{C}(1) = (c_{11}(1), \dots, c_{1n}(1); c_{21}(1), \dots, c_{2n}(1); \dots; c_{m1}(1), \dots, c_{mn}(1))^T, \quad (17)$$

а гиперматрицы

$$\begin{cases} G(1,0) = \sum_{l=1}^p (A_l(1) \otimes B_l^T(0)), \\ G(0,1) = \sum_{l=1}^p (A_l(0) \otimes B_l^T(1)). \end{cases} \quad (18)$$

Далее, с учетом (16)–(18), из (15) получим

$$G(0,0) \hat{X}(1) + \left[\sum_{\substack{q+r=1 \\ q=0,1 \\ r=0,1}} G(q,r) \right] \hat{X}(0) = \hat{C}(1),$$

откуда

$$\hat{X}(1) = G^{-1}(0,0) \left\{ \hat{C}(1) - \left[\sum_{\substack{q+r=1 \\ q=0,1 \\ r=0,1}} C(q,r) \right] \hat{X}(0) \right\}; \quad (19)$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} & A_1(2) \cdot X(0) \cdot B_1(0) + A_1(0) \cdot X(2) \cdot B_1(0) + \\ & + A_1(0) X(0) B_1(2) + A_1(1) X(1) B_1(0) + \\ & + A_1(1) X(0) B_1(1) + A_1(0) X(1) B_1(1) + \\ & + A_2(2) X(0) B_2(0) + A_2(0) X(2) B_2(0) + \\ & + A_2(0) X(0) B_2(2) + A_2(1) X(1) B_2(0) + \\ & + A_2(1) X(0) B_2(1) + A_2(0) X(1) B_2(1) + \dots \\ & \dots + A_p(2) X(0) B_p(0) + A_p(0) X(2) B_p(0) + \\ & + A_p(0) X(0) B_p(2) + A_p(1) X(1) B_p(0) + \\ & + A_p(1) X(0) B_p(1) + A_p(0) X(1) B_p(1) = C(2) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^p A_l(2) X(0) B_l(0) + \sum_{l=1}^p A_l(1) X(1) B_l(0) + \\ & + \sum_{l=1}^p A_l(0) X(2) B_l(0) + \sum_{l=1}^p A_l(1) X(0) B_l(1) + \\ & + \sum_{l=1}^p A_l(0) X(0) B_l(2) + \sum_{l=1}^p A_l(0) X(1) B_l(1) = C(2). \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда, по аналогии (8) или (14), из (20) имеем

$$\begin{aligned} & G(2,0) \hat{X}(0) + G(1,0) \hat{X}(1) + G(0,0) \hat{X}(2) + \\ & + G(1,1) \hat{X}(0) + G(0,2) \hat{X}(0) + G(0,1) \hat{X}(1) = \hat{C}(2), \end{aligned} \quad (21)$$

где составные векторы

$$\begin{aligned} \hat{X}(2) = & (x_{11}(2), \dots, x_{1n}(2); x_{21}(2), \dots, \\ & x_{2n}(2); \dots; x_{m1}(2), \dots, x_{mn}(2))^T, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \hat{C}(2) = & (\tilde{n}_{11}(2), \dots, \tilde{n}_{1n}(2); \tilde{n}_{21}(2), \dots, \\ & \tilde{n}_{2n}(2); \dots; \tilde{n}_{m1}(2), \dots, \tilde{n}_{mn}(2))^T, \end{aligned} \quad (23)$$

а гиперматрицы

$$\begin{cases} G(2,0) = \sum_{l=1}^p (A_l(2) \otimes B_l^T(0)), \\ G(1,1) = \sum_{l=1}^p (A_l(1) \otimes B_l^T(1)), \\ G(0,2) = \sum_{l=1}^p (A_l(0) \otimes B_l^T(2)). \end{cases} \quad (24)$$

Далее, с учетом (22)–(24), из (21) получим

$$\begin{aligned} & G(0,0) \hat{X}(2) + \left[\sum_{\substack{q+r=2 \\ q=0,2 \\ r=0,2}} G(q,r) \right] \times \\ & \times \hat{X}(0) + \left[\sum_{\substack{q+r=1 \\ q=0,1 \\ r=0,1}} G(q,r) \right] \hat{X}(1) = \hat{C}(2), \end{aligned}$$

откуда

$$\hat{X}(2) = G^{-1}(0,0) \left\{ \hat{C}(2) - \left[\sum_{\substack{q+r=2 \\ q=0,2 \\ r=0,2}} G(q,r) \right] \times \right. \\ \left. \times \hat{X}(0) - \left[\sum_{\substack{q+r=1 \\ q=0,1 \\ r=0,1}} G(q,r) \right] \hat{X}(1) \right\}. \quad (25)$$

Теперь, не вдаваясь в подробности, представим общее окончательное соотношение по определению K -го гипервекторного дискрета $\hat{X}(K)$ составного вектора $X(t)$. Имея ввиду (13), (19) и (25), получим:

$$\begin{aligned} & \hat{X}(K) = G^{-1}(0,0) \times \\ & \left\{ \begin{aligned} & C(K) - \left[\sum_{\substack{q+r=K \\ q=0,K \\ r=0,K}} G(q,r) \right] \times \\ & \times \hat{X}(0) - \left[\sum_{\substack{q+r=K-1 \\ q=0,K-1 \\ r=0,K-1}} G(q,r) \right] \times \\ & \times \hat{X}(1) - \dots - \left[\sum_{\substack{q+r=1 \\ q=0,1 \\ r=0,1}} G(q,r) \right] \hat{X}(K-1) \end{aligned} \right\}, \end{aligned} \quad (26)$$

где составные векторы

$$\hat{X}(K) = \left(x_{11}(K), \dots, x_{1n}(K); x_{21}(K), \dots, \right. \\ \left. \dots, x_{2n}(K); \dots; x_{m1}(K), \dots, x_{mn}(K) \right)^T, \quad (27)$$

$$C(K) = \left(c_{11}(K), \dots, c_{1n}(K); c_{21}(K), \dots, c_{2n}(K); \dots; c_{m1}(K), \dots, c_{mn}(K) \right)^T, \quad (28)$$

а гиперматрица

$$\left\{ \begin{aligned} G(K, 0) &= \sum_{l=1}^P (A_l(K) \otimes B_l^T(0)), \\ G(K-1, 0) &= \sum_{l=1}^P (A_l(K-1) \otimes B_l^T(0)), \dots, \\ G(1, 1) &= \sum_{l=1}^P (A_l(1) \otimes B_l^T(1)), \\ G(1, 0) &= \sum_{l=1}^P (A_l(1) \otimes B_l^T(0)), \\ G(0, 0) &= \sum_{l=1}^P (A_l(0) \otimes B_l^T(0)), \\ G(0, 1) &= \sum_{l=1}^P (A_l(0) \otimes B_l^T(1)), \dots, \\ G(0, K-1) &= \sum_{l=1}^P (A_l(0) \otimes B_l^T(K-1)), \\ G(0, K) &= \sum_{l=1}^P (A_l(0) \otimes B_l^T(K)). \end{aligned} \right. \quad (29)$$

Таким образом, с учетом (27)–(29), вычислив составные векторы дискрет $X(0), X(1), X(2), \dots, X(K)$, в соответствии с представлениями (13), (19), (25), (26), с учетом некоторого матричного обратного дифференциального преобразования (6) можно восстанавливать решение (2).

Модельный пример

Пусть задано однопараметрическое линейное матричное уравнение с комплексными матрицами

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} (1+t) & 0 & 0 \\ (-1+jt) & (1+j) & 0 \\ 0 & jt & 1 \end{bmatrix} \cdot X(t) \cdot \begin{bmatrix} j & 1 \\ 0 & jt \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ j & (1-jt) & 1 \\ jt & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) \cdot \begin{bmatrix} 1 & j \\ jt & 0 \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} 0 & 1 & jt \\ 0 & jt & 1 \\ j & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 & -jt \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} (2-2t+jt+3jt^2) & (t+t^2) \\ (t+t^2+j+4jt) & (-4t+2jt+jt^2) \\ (2jt+jt^2) & (-t-2t^2+jt^2) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где $j=\sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Тогда, при $t_v=0$, $H=1$ приходим к следующим маклореновским матричным дискретам: при $K=0$:

$$A_1(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & (1+j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_1(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ j & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_1(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 2;$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} j & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix}, \quad B_1(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 2;$$

$$A_2(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ j & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j & 0 \\ j & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 2;$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ j & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 2;$$

$$A_3(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ j & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_3(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & j \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 2;$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3(1) = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \forall K \geq 2.$$

$$C(0) = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ j & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C(1) = \begin{bmatrix} (-2+j) & 1 \\ (1+4j) & (-4+2j) \\ 2j & -1 \end{bmatrix},$$

$$C(2) = \begin{bmatrix} 3j & 1 \\ 1 & j \\ j & (-2+j) \end{bmatrix}, \quad C(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k \geq 3.$$

Следовательно, имея ввиду (12), получим

$$A_1(0) \otimes B_1^T(0) = \begin{bmatrix} j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -j & 0 & (-1+j) & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & (1+j) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2(0) \otimes B_2^T(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j & 0 \\ j & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3(0) \otimes B_3^T(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$G(0,0) = \begin{bmatrix} j & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j & 0 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & (1+2j) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 1 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G^{-1}(0,0) = -\frac{1}{3+2j} \times \begin{bmatrix} 0 & (-1-2j) & 0 & 1 & 0 & (-2+j) \\ 0 & -4j & 0 & -2j & (-2+3j) & (-1+2j) \\ 0 & -2 & 0 & -1 & 0 & 2j \\ (-3-2j) & (-2-j) & 0 & -2j & 0 & 2 \\ 0 & 2j & 0 & j & 0 & (-1-2j) \\ 0 & 2j & (-3-2j) & j & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

а составной вектор $\hat{X}(0)$ с учетом (13) и нулевым по номеру матричная дискрета $X(0)$ будут выглядеть так:

$$\hat{X}(0) = G^{-1}(0,0) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ j \end{pmatrix}, \quad X(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \\ 0 & j \end{bmatrix}.$$

Далее, при $K=1$ имеем:

$$A_1(1) \otimes B_1^T(0) = \begin{bmatrix} j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2(1) \otimes B_2^T(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3(1) \otimes B_3^T(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(1,0) = \begin{bmatrix} j & 0 & 0 & 0 & 0 & j \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -j & j & 0 & 0 \\ j & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ j & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & j & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$(0) \otimes B_1^T(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j & 0 & (-1+j) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j \end{bmatrix},$$

$$A_2(0) \otimes B_2^T(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3(0) \otimes B_3^T(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -j & 0 \end{bmatrix},$$

Следовательно, в соответствии с (15) имеем

$$G(0,0) \cdot \hat{X}(1) = \hat{C}(1) - G(1,0) \cdot \hat{X}(0) - G(0,1) \cdot \hat{X}(0) = \begin{pmatrix} (-2+j) \\ 1 \\ (-4+2j) \\ 2j \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -2+2j \\ 2j \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j \\ 1 \\ -2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

откуда составной вектор $\hat{X}(1)$ и матричная дискрета $X(1)$ выглядят так:

$$\hat{X}(1) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad X(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\hat{X}(2) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad X(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

И, наконец, при $K=2$ получим:

$$G(2,0) = A_1(2) \otimes B_1^T(0) + A_2(2) \otimes B_2^T(0) + A_3(2) \otimes B_3^T(0) = [0],$$

$$G(1,1) = A_1(1) \otimes B_1^T(1) + A_2(1) \otimes B_2^T(1) +$$

$$+ A_3(1) \otimes B_3^T(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(0,2) = A_1(0) \otimes B_1^T(2) + A_2(0) \otimes B_2^T(2) + A_3(0) \otimes B_3^T(2) = [0].$$

Следовательно, в соответствии с (21) имеем:

$$\begin{aligned} G(0,0) \cdot \hat{X}(2) &= C(2) - G(2,0) \cdot \hat{X}(0) - G(1,0) \cdot \hat{X}(1) - \\ &- G(1,1) \cdot \hat{X}(0) - G(0,2) \cdot \hat{X}(0) - G(0,1) \cdot \hat{X}(1) = \\ &= \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 3j \\ 1 \\ 1 \\ j \\ j \\ (-2+j) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2j \\ 1 \\ -1 \\ j \\ j \\ -1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ (1+j) \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

откуда составной вектор $\hat{X}(2)$ и матричная дискретта $X(2)$ выглядят так:

Такая же картина, как нетрудно убедиться, имеет место и при $\forall K \geq 3$.

Следовательно, окончательное решение задачи $X(t)$ с учетом матричных дискрет $X(0), X(1), X(2)$ при использовании обратных дифференциально-маклореновских преобразований [22–27] имеет вид:

$$X(t) = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 2 \\ 0 & (j+t) \end{bmatrix}.$$

В абсолютной точности этого решения можно легко убедиться его подстановкой в исходное матричное уравнение.

Замечание 1. Очевидно, что разработанный метод можно использовать и для однопараметрических линейных матричных уравнений более общего вида – для уравнений с прямоугольными матрицами $A_l(t)$ и $B_l(t)$, $l=1, p$.

Замечание 2. В тех случаях, когда $\text{rang}G(0,0) < m \cdot n$, можно поменять центр аппроксимации t_v таким образом, чтобы имело место условие $\text{rang}G(0,0) = m \cdot n$, (или, что одно и то же, $\exists G^{-1}(0,0)$) и использовать вычислительные схемы (13), (19), (25) и (26).

Заключение

Таким образом, для нахождения непрерывных решений однопараметрических линейных матричных уравнений (1) при предложенном методе оперируем рекуррентными численными матрично-векторными вычислительными процедурами (9)–(13), (14)–(19), (20)–(25) и (26)–(29), которые предоставляют широкие возможности для эффективного использования средств современных информационных технологий [28–31].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 1998. – 574 с.
2. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
3. Трофимов А.Н., Егупов Н.Д., Дмитриев А.Н. Методы теории автоматического управления, ориентированные на применение ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 653 с.
4. Helmke U., Moore J.B. Optimization and Dynamical Systems. – London: Springer-Verlag, 1994. – 389 p.
5. Беклемишев Д. В. Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 385 с.
6. Беллман Р. Введение в теорию матриц. – М.: Наука, 1976. – 351 с.

7. Воронцов Ю. О. Условия разрешимости и численные алгоритмы для решения линейных, полулинейных, квадратичных и полуторалинейных матричных уравнений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: 2014. – 17 с.
8. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – М.: Наука, 2010. – 575 с.
9. Икрамов Х. Л. Численное решение матричных уравнений. – М.: Наука, 1984. – 190 с.
10. Ланкастер П. Теория матриц. – М.: Наука, 1978. – 280 с.
11. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. – М.: Мир, 1989. – 666 с.
12. Цехан О.Б. Матричный анализ. – Гродно: ГГУ, 2004. – 371 с.
13. Ганьшин В.Н. Псевдообращение матрицы нормальных уравнений свободных геодезических сетей // Известия вузов. Геодезия, аэрофотосъемка. – 1989. – Вып. 6. – С. 3–5.
14. Губанов В.С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астромерии. – СПб.: Наука, 1997. – 319 с.

15. Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 273 с.
16. Капустин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. – СПб.: Недра, 2002. – 424 с.
17. Михалевиц И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий: Statistica). – Иркутск: ИГУ, 2006. – 115 с.
18. Светлаков А.А. Обобщённые обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 388 с.
19. Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized Inverses: Theory and Applications. – NYC: Springer, 2003. – 435 p.
20. Campbell S.L., Meyer C.D. Generalized Inverses of Linear Transformations. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2008. – 232 p.
21. Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices and Singular Value Decomposition. – NYC: Spring, 2011. – 236 p.
22. Симонян С.О. Методы определения комплексных однопараметрических обобщённых обратных матриц // Известия ТПУ. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 157–163.
23. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. – Киев: Наукова думка, 1984. – 420 с.
24. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 158 с.
25. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований. – Киев: Наукова думка, 1988. – 246 с.
26. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.
27. Симонян С.О., Аветисян А.Г. Прикладная теория дифференциальных преобразований. – Ереван: Чартарагет, 2010. – 361.
28. Метьюз Дж.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. – М.: Сиб-Киев, 2001. – 713 с.
29. Шлее М. Qt 9.8. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 912 с.
30. Stroustrup B. The C++ Programming Language. 4th ed. – Boston: Addison – Wesley Professional, 2013. – 1368 p.
31. The Math Works, Inc., MATLAB. The Language of technical programming using MATLAB Graphics, Version 7.

Поступила 04.12.2014 г.

UDC 621.52+511.52

METHOD FOR SOLVING ONE-PARAMETER LINEAR EQUATIONS BASED ON DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS

Sargis H. Simonyan,

National Engineering University of Armenia (Polytechnic), 105, Teryan street,
Yerevan, 0009, Armenia. E-mail: ssimonyan@seua.am

Ruben A. Papovyan,

National Engineering University of Armenia (Polytechnic), 105, Teryan street,
Yerevan, 0009, Armenia. E-mail: ruben.papovyan@gmail.com

The relevance of the research is caused by the need to develop a new efficient method for defining continuous solutions of one-parametric linear matrix equations, often found in various studies, such as identification of electromechanical energy transformer parameters, optimization of electrical circuits parameter, registration and processing of borehole geophysics measurements, etc.

The aim of the research is to develop a simple constructive numerical-analytical method for determining the solution of the mentioned class of problems, which is easy to implement by the modern information technology.

The investigation methods. For solving the considered problems, the authors have applied the method of matrix linear algebra, matrix theory method, as well as the direct and inverse differential transforms of G.E. Pukhov, which differ from the well-known integral transforms by rather positive characteristics – a differentiating operation instead of integrating operations (direct transformation) and a summing operation instead of integrating operation (inverse transformation).

The results. The authors proposed the constructive numerical-analytical method for solving one-parametric linear matrix equations by using differential transformation. In this case, the solution of the original continuous problem is actually reduced to solving the recurrent chain of some linear systems of algebraic equations by numerical invariant hypermatrix and hypervectors of free members of the right parts, when the matrix discretizes for solving the original problem are determined. Then, on the basis of a reducing ratio (inverse differential transformations) the continuous solution of the original problem is determined. The paper considers the model example. Solving this example the exact Maclaurin analytical solution confirming the simplicity and the high computational efficiency of the method is obtained by numerical-analytical method.

Conclusions. The proposed constructive numerical-analytical method is based on two basic mathematical apparatus – the operating method of differential transformation and information solutions obtained with the recurrence of linear matrix equations to solve the recurrence of equivalent linear systems of algebraic equations in the widespread use works of kronikorov numerical matrices.

Key words:

Geoinformation systems, one-parametric linear matrix equations, differential transformations, recurrent chain of linear systems of algebraic equations, matrix discrete, continuous solution, model example.

REFERENCES

- Afanasev V.N., Kolmanovsky V.B., Nosov V.R. *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* [Mathematical theory of designing control systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998. 574 p.
- Kvakernaak H., Sivan R. *Lineynye optimalnye sistemy upravleniya* [Linear optimal control systems]. Moscow, Mir Publ., 1977. 650 p.
- Trofimov A.N., Egupov N.D., Dmitriev A.N. *Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya, orientirovannye na primeneniye EVM* [Methods of the automated control theory, oriented to computer application]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1997. 653 p.
- Helmke U., Moore J.B. *Optimization and Dynamical Systems*. London, Springer-Verlag, 1994. 389 p.
- Beklemishev D.V. *Dopolnitelnye glavy lineynoy algebrы* [Complementary chapters of linear algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 385 p.
- Bellman R. *Vvedenie v teoriyu matrits* [Introduction into the matrix system]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 351 p.
- Vorontsov Yu.O. *Usloviya razreshimosti i chislennyye algoritmy dlya resheniya lineynykh, polulineynykh, kvadrachnykh i polutoralineynykh matrichnykh uravneniy. Aftoreferat Dis. Kand. nauk* [Conditions of solubility and numerical algorithms for solving linear, semi-linear, squared and semi-linear matrix equations. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2014. 17 p.
- Gantmaher F. R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 575 p.
- Ikramov H. L. *Chislennoe reshenie matrichnykh uravneniy* [Numerical solution of matrix equations]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 190 p.
- Lankaster P. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 280 p.
- Horn R., Dzhonson Ch. *Matrichny analiz* [Matrix analysis]. Moscow, Mir Publ., 1989. 666 p.
- Tsekhan O.B. *Matrichny analiz* [Matrix analysis]. Grodno, GGU Press, 2004. 371 p.
- Ganshin V.N. *Psevdoobrashchenie matritsy normalnykh uravneniy svobodnykh geodezicheskikh setey* [Pseudoinversion of normal equation matrices of free geodetic networks]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya, aerofotosemka*, 1989, Iss. 6, pp. 3–5.
- Gubanov V.S. *Obobshchenny metod naimenshikh kvadratov. Teoriya i primeneniye v astrometrii* [Generalized method of the least squares. Theory and application in astrometry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1997. 319 p.
- Zhurkin I.G., Shaytura S.V. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geo-information systems]. Moscow, KUDIC-PRESS, 2009. 273 p.
- Kapustin Yu.E. *Gornyye kompyuternyye tekhnologii i geostatistika* [Mining computer technologies]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2002. 424 p.
- Mikhalevich I.M. *Primeneniye matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informatsii (s ispolzovaniem kompyuternykh tekhnologiy: Statistika)* [Application of mathematical methods when analyzing geological information (using computer technologies: Statistika)]. Irkutsk, IGU Press, 2006. 115 p.
- Svetlakov A.A. *Obobshchennyye obratnyye matritsy: nekotoryye voprosy teorii i primeneniya v zadachakh avtomatizatsii upravleniya protsessami* [Generalized inverses: some issues of the theory and applications in the tasks of process control automation]. Tomsk, NTL Publ., 2003. 388 p.
- Ben-Israel A., Greville T.N.E. *Generalized Inverses: Theory and Applications*. NYC, Springer, 2003. 435 p.
- Campbell S.L., Meyer C.D. *Generalized Inverses of Linear Transformations*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2008. 232 p.
- Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. *Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices and Singular Value Decomposition*. NYC, Spring, 2011. 236 p.
- Simonyan S.O. *Metody opredeleniya kompleksnykh odnoparametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits* [Methods for determining complex single-parametric inverse matrices]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 157–163.
- Pukhov G.E. *Differentsialnye preobrazovaniya funktsiy i uravneniy* [Differential transformations of functions and equations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1984. 420 p.
- Pukhov G.E. *Differentsialnye preobrazovaniya i matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Differential transformations and mathematical modeling of physical processes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 158 p.
- Pukhov G.E. *Priblizhennyye metody matematicheskogo modelirovaniya, osnovannyye na primeneniі differentsialnykh T-preobrazovaniy* [Approximate methods of mathematical modeling, based on application of differential T-transforms]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 246 p.
- Pukhov G.E. *Differentsialnye spektry i modeli* [Differential spectra and models]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 184 p.
- Simonyan S.O., Avetisyan A.G. *Prikladnaya teoriya differentsialnykh preobrazovaniy* [Applied theory of differential transformations]. Erevan, Chartaraget publ., 2010. 361 p.
- Metews J.G., Fink K.D. *Chislennyye metody. Ispolzovanie MATLAB* [Numerical methods. Use of MATLAB]. Moscow, Sib-Kiev, 2001. 713 p.
- Shlee M. Qt 9.8. *Professionalnoe programirovanie na S++* [Qt 9.8. Professional programming in S++]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2012. 912 p.
- Stroustrup B. *The S++ Programming Language*. 4th ed. Boston, Addison – Wesley Professional, 2013. 1368 p.
- The Math Works, Inc., MATLAB. The Language of technical programming using MATLAB Graphics, Version 7.*

Received: 04 December 2014.

УДК 536.24

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРЯМОМ РЕБРЕ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ЛУЧИСТОМ ОТВОДЕ ТЕПЛА ОТ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Видин Юрий Владимирович,

канд. техн. наук, профессор каф. теплотехники и гидрогазодинамики
Факультета энергетики Сибирского федерального университета, Россия,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: roman.kazakov@list.ru

Казаков Роман Владимирович,

канд. техн. наук, доцент каф. теплотехники и гидрогазодинамики
Факультета энергетики Сибирского федерального университета, Россия,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: roman.kazakov@list.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения массы и габаритов радиационных высокотемпературных теплообменных систем при одновременном повышении их энергетической эффективности. Это может быть достигнуто за счет соответствующего профилирования ребристых элементов. Такие поверхности находят широкое применение в различных областях современной техники. При этом особый научный и практический интерес представляют проблемы лучистого теплообмена развитых поверхностей.

Цель работы: получить сравнительно несложный с математической точки зрения приближенный аналитический метод расчета распределения температуры в ребрах переменного сечения при радиационном отводе тепла с их поверхности, обладающий достаточной инженерной точностью.

Методы исследования: использование предложенного авторами линеаризующего преобразования, позволяющего существенно уменьшить влияние нелинейного слагаемого в исходном дифференциальном уравнении переноса энергии.

Результат. Предложен приближенный математический метод, основанный на получении нижней и верхней числовых оценок искомого температурного поля. Этот способ обладает с инженерной точки зрения вполне приемлемой точностью и одновременно является сравнительно несложным. При этом, как правило, достаточно ограничиться двумя первыми приближениями. Приведенные в статье расчетные зависимости для трапециевидных ребер могут быть использованы также в частном случае и для клиновидных ребер. Рекомендуемые математические выражения позволяют провести оценку как верхнего, так и нижнего значений искомого температурного поля. Кроме этого, на их основе можно дополнительно рассчитать коэффициенты тепловой эффективности рассмотренных ребристых систем в случае лучистого теплообмена. Разработанный метод может быть применен и в более сложных граничных условиях.

Ключевые слова:

Температурное поле, радиационный теплообмен, трапециевидная ребристая поверхность, аналитический метод, модифицированные функции Бесселя.

Введение

Одним из эффективных способов усиления теплообмена считается дополнительное увеличение площади поверхности стенки с той стороны, на которой внешнее термическое сопротивление является наибольшим [1–9]. Развитые поверхности обычно имеют форму ребер, прикрепленных к твердому телу. При выборе конструкции ребер ориентируются на то, чтобы они обеспечивали максимально возможную тепловую эффективность, имели минимальную стоимость высокотеплопроводного материала, малую массу, удобные размеры, небольшое гидравлическое сопротивление, достаточную механическую прочность и сравнительно несложную технологию изготовления.

Как правило, тепловой процесс функционирования ребренных конструкций можно считать стационарным или весьма близким к нему. Многочисленные исследования явлений переноса тепла в различных по конструкции ребренных системах представлены в частности в фундаментальных работах [1–9]. В основном они посвящены изучению линейных задач, решение которых может быть представлено в виде достаточно строгих, с математической точки зрения, аналитических зависимостей.

Однако в ряде случаев подобные задачи оказываются существенно нелинейными. Это, например, может иметь место, если теплообмен между ребристой поверхностью и окружающей средой осуществляется излучением.

В настоящей работе представлены результаты теоретического подхода к анализу подобного класса задач. В практике нашли широкое применение прямые ребра трапециевидного профиля, применение которых позволяет заметно снизить массу ребренной стенки по сравнению со стенкой с прямоугольными ребрами.

Постановка задачи

Дифференциальное уравнение теплопроводности для такой конструкции ребра при стационарном режиме и лучистом взаимодействии с окружающей средой, температура которой близка к нулю, может быть записано в следующем виде

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{x} \frac{\sigma_B}{\lambda \sin \varphi} T^4 = 0, \quad (1)$$

а граничные условия

$$T=T_0 \text{ при } x=x_1, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dx} = 0 \text{ при } x=x_0, \quad (3)$$

Здесь $T=T(x)$ – искомое распределение температуры, К; λ – коэффициент теплопроводности материала ребра, Вт/мК; σ_B – видимый коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м²К⁴); x – продольная координата, начало которой находится в точке, удаленной от вершины ребра на расстоянии x_0 , м; l – высота ребра, ($x_1=l+x_0$), м; δ_0 и δ_1 – минимальная и максимальная толщина ребра соответственно, м; T_0 – температура основания ребра, К, φ – угол между осью ребра и его наружной поверхностью, как правило не превышает 5–6 град.

Решение

Целесообразно систему (1)–(3) привести к безразмерному виду. Для этого нужно ввести безразмерную температуру $\vartheta = \frac{T}{T_0}$, безразмерную про-

дольную координату $X = \frac{x}{l+x_0}$ и безразмерное ра-

диационное число Старка $Sk = \frac{\sigma_B T^3 (l+x_0)}{\lambda \sin \varphi}$.

Тогда задача (1)–(3) запишется следующим образом

$$\frac{d^2 \vartheta}{dX^2} + \frac{1}{X} \frac{d\vartheta}{dX} - \frac{Sk}{X} \vartheta^4 = 0, \quad (4)$$

$$\vartheta=1 \text{ при } X=1, \quad (5)$$

$$\frac{d\vartheta}{dX} = 0 \text{ при } X = X_0 = \frac{x_0}{l+x_0}. \quad (6)$$

Так как дифференциальное уравнение (4) является существенно нелинейным, то получить строгое аналитическое решение задачи (4)–(6) весьма затруднительно.

Однако для инженерных расчетов, как правило, достаточно ограничиться приближенным математическим методом, который обладал бы приемлемой точностью и был одновременно сравнительно несложным. В этой связи наиболее подходящим следует признать способ, основанный на получении нижней и верхней оценок искомого температурного поля $\vartheta(X)$ при условии, что граничные функции расположены сравнительно близко друг к другу. В рассматриваемом случае целесообразно трансформировать зависимость (4) на основе интегрального линеаризующего преобразования, предложенного в работах [7–10]. Согласно этому рекомендуемому подходу вводится новая зависящая переменная $U=U(X)$, связанная с $\vartheta(X)$ относительно простым соотношением

$$U(X) = \int_1^{\vartheta(X)} \frac{d\eta}{\eta^4} = \frac{1}{3}(1 - \vartheta^{-3}). \quad (7)$$

Отсюда следует, что

$$\vartheta(X) = \sqrt[3]{\frac{1}{1-3U(X)}}. \quad (8)$$

С учетом преобразования (7) система (4)–(6) принимает вид

$$\frac{d^2 U}{dX^2} + \frac{1}{X} \frac{dU}{dX} + 4\vartheta^4 \left(\frac{dU}{dX}\right)^2 - \frac{Sk}{X} = 0, \quad (9)$$

$$U=0 \text{ при } X=1, \quad (10)$$

$$\frac{dU}{dX} = 0 \text{ при } X=X_0. \quad (11)$$

Нелинейный комплекс $F(X) = 4\vartheta^3 \left(\frac{dU}{dX}\right)^2$, по-

явившийся в преобразованном уравнении (9), оказывает более слабое математическое влияние, чем функция ϑ^4 в исходном уравнении (4), что обусловлено в определенной степени граничным соотношением (11).

Функциональный комплекс $F(X)$, входящий в зависимость (9), можно рассматривать с физической точки зрения как некоторый распределенный по длине ребра внутренний положительный источник тепла, действующий непрерывно.

Поэтому, если в первом приближении его не учитывать, то интегрирование системы (9)–(11) позволит определить $U(X)$, а затем и искомую температуру $\vartheta(X)$, которая, в связи с принятым допущением, будет являться нижней оценкой для фактического распределения температуры [11, 12].

Очевидно, что при условии $F(X)=0$, решение для функции $U(X)$ принимает вид

$$U(X) = -Sk[(1-X) + X_0 \ln X]. \quad (12)$$

Следовательно, минимальное распределение температуры по длине прямого трапециевидного ребра в результате подстановки (12) в (8) запишется в простой математической форме

$$\vartheta_{\text{наим}}(X) = \sqrt[3]{\frac{1}{1+3Sk[(1-X) + X_0 \ln X]}}. \quad (13)$$

Отсюда также вытекает, что теоретически минимальная температура для вершины рассматриваемого ребра будет равна

$$\vartheta_{\text{наим}}(X = X_0) = \sqrt[3]{\frac{1}{1+3Sk[(1-X_0) + X_0 \ln X_0]}}. \quad (14)$$

Для нахождения верхней границы искомой температуры $\vartheta(X)$ нужно принять нелинейный комплекс $F(X)$, представляющий в уравнении (9), как уже отмечалось выше, некоторый условный положительный внутренний источник тепловыделения, максимально гипотетически возможным, а именно

$$F(X) = 4 \left(\frac{dU}{dX}\right)^2,$$

т. е. сделано допущение, что

$$\vartheta^3(X) = 1.$$

Тогда зависимость (9) запишется

$$\frac{d^2U}{dX^2} + \frac{1}{X} \frac{dU}{dX} + 4 \left(\frac{dU}{dX} \right)^2 - \frac{Sk}{X} = 0. \quad (15)$$

Для осуществления интегрирования дополнительной задачи (15), (10), (11) целесообразно ввести новую зависимость переменную на основе соотношения.

$$\frac{dU}{dX} = W. \quad (16)$$

С учетом (16) система (15), (10), (11) преобразуется к виду

$$\frac{dW}{dX} + \frac{1}{X} W + 4W^2 - \frac{Sk}{X} = 0, \quad (17)$$

причем

$$W=0 \text{ при } X=X_0. \quad (18)$$

Аналитическое решение нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения (17), относящегося к классу уравнений Риккати [13], может быть представлено через модифицированные функции Бесселя [14–17].

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Sk}{X}} \frac{I_1(4\sqrt{SkX}) - AK_1(4\sqrt{SkX})}{I_0(4\sqrt{SkX}) + AK_0(4\sqrt{SkX})}. \quad (19)$$

Постоянная A находится из условия (18)

$$A = \frac{I_1(4\sqrt{SkX_0})}{K_1(4\sqrt{SkX_0})}. \quad (20)$$

Тогда, с учетом равенства (20), решение (19) примет вид

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Sk}{X}} \frac{I_1(4\sqrt{SkX})K_1(4\sqrt{SkX_0}) - K_1(4\sqrt{SkX})I_1(4\sqrt{SkX_0})}{I_0(4\sqrt{SkX})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{SkX})I_1(4\sqrt{SkX_0})}. \quad (21)$$

Далее, подставляя (21) в зависимость (16) и учитывая условия (10), нетрудно получить выражения для промежуточной функции $U(X)$

$$U(X) = \ln \sqrt[4]{\frac{I_0(4\sqrt{SkX})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{SkX})I_1(4\sqrt{SkX_0})}{I_0(4\sqrt{Sk})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{Sk})I_1(4\sqrt{SkX_0})}}. \quad (22)$$

Следовательно, верхняя предельная граница для искомого распределения температуры может быть рассчитана по формуле

$$\mathcal{G}_{\text{наиб}}(X) = \sqrt[3]{1 + 3 \ln \sqrt[4]{\frac{I_0(4\sqrt{Sk})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{Sk})I_1(4\sqrt{SkX_0})}{I_0(4\sqrt{SkX})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{SkX})I_1(4\sqrt{SkX_0})}}}. \quad (23)$$

На основе зависимости (23) легко вычислить наибольшую температуру на конце трапециевидного ребра ($X=X_0$)

$$\mathcal{G}_{\text{наиб}}(X=X_0) = \sqrt[3]{1 + 3 \ln \sqrt[4]{\frac{I_0(4\sqrt{Sk})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{Sk})I_1(4\sqrt{SkX_0})}{I_0(4\sqrt{SkX_0})K_1(4\sqrt{SkX_0}) + K_0(4\sqrt{SkX_0})I_1(4\sqrt{SkX_0})}}}. \quad (24)$$

Однако, учитывая, что согласно теории Бесселевых функций [17–19] сумма

$$I_0(a)K_1(a) + I_1(a)K_0(a) = \frac{1}{a},$$

решение (24) может быть существенно упрощено

$$\mathcal{G}_{\text{наиб}}(X=X_0) = \sqrt[3]{1 + 3 \ln \sqrt[4]{a \frac{I_0(4\sqrt{Sk})K_1(a) + K_0(4\sqrt{Sk})I_1(a)}{I_0(a)K_1(a) + I_1(a)K_0(a)}}}, \quad (25)$$

где параметр a равен

$$a = 4\sqrt{SkX_0}.$$

Если окажется необходимым уменьшить расчетный интервал между верхней и нижней границами для действительного распределения температуры $\mathcal{G}(X)$, то это можно достигнуть путем интегрирования вместо дифференциального уравнения (15) его аналога

$$\frac{d^2U_1}{dX^2} + \frac{1}{X} \frac{dU_1}{dX} + m \left(\frac{dU_1}{dX} \right)^2 - \frac{Sk}{X} = 0, \quad (26)$$

где параметр m принимается равным величине $m=4\mathcal{G}_{\text{наиб}}^3(X=X_0)$, причем значение $\mathcal{G}_{\text{наиб}}^3(X=X_0)$ определяется по формуле (14).

В этом случае промежуточная функция W_1 должна рассчитываться по выражению

$$W_1 = \sqrt{\frac{Sk}{mX}} \frac{I_1(2\sqrt{2mSkX})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) - K_1(2\sqrt{mSkX})I_1(2\sqrt{mSkX_0})}{I_0(2\sqrt{mSkX})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSkX})I_1(2\sqrt{mSkX_0})}. \quad (27)$$

Затем по подобию с предыдущими математическими действиями осуществляется переход к новому варианту зависимости $U_1(x)$ на основе соотношения

$$U_1(x) = \int W_1 dx + C, \quad (28)$$

где постоянная интегрирования C определяется, как и ранее, из условия

$$U_1=0 \text{ при } x=1. \quad (29)$$

Подставляя (27) в (28) и учитывая (29), нетрудно получить окончательное решение для U_1 .

$$U_1 = \frac{1}{m} \ln \frac{I_0(2\sqrt{mSk})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSk})I_1(2\sqrt{mSkX_0})}{I_0(2\sqrt{mSkX})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSkX})I_1(2\sqrt{mSkX_0})}. \quad (30)$$

Отсюда следует, что более близкая функциональная зависимость к фактическому распределению температуры снизу может быть установлена с помощью подстановки формулы (30) в выражение (8)

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X) &= \\ &= \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{3}{m} \ln \frac{I_0(2\sqrt{mSk})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSk})I_1(2\sqrt{mSkX_0})}{I_0(2\sqrt{mSkX})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSkX})I_1(2\sqrt{mSkX_0})}}}. \end{aligned} \quad (31)$$

Отсюда легко найти наименьшее граничное значение температуры на вершине исследуемого ребра ($X=X_0$)

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X=X_0) &= \\ &= \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{3}{m} \ln \left(\frac{2\sqrt{mSkX_0} \times \left[I_0(2\sqrt{mSk})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSk})I_1(2\sqrt{mSkX_0}) \right]}{\left[I_0(2\sqrt{mSk})K_1(2\sqrt{mSkX_0}) + K_0(2\sqrt{mSk})I_1(2\sqrt{mSkX_0}) \right]} \right)}}. \end{aligned} \quad (32)$$

Действительная величина температуры $\mathcal{G}(X=X_0)$ располагается между рассчитанными соответственно по выражениям (24) и (32), то есть

$$\mathcal{G}_{\text{наиб}}(X=X_0) > \mathcal{G}(X=X_0) > \mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X=X_0), \quad (33)$$

причем

$$\mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X=X_0) > \mathcal{G}_{\text{наим}}(X=X_0).$$

Очевидно, что подобным образом можно найти и последующие приближения для нижней границы $\mathcal{G}(X)$, используя предыдущие числовые значения $\mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X=X_0)$, $\mathcal{G}_{\text{наим}_2}(X=X_0)$ и т. д.

Однако на практике вполне достаточно ограничиться расчетной зависимостью (31), так как последующие итерации оказывают незначительное влияние на степень приближения. Как правило, интервал между температурными кривыми, рассчитываемыми по (24) и (32), оказывается очень узким, что позволяет получить весьма близкие оценки истинного распределения температуры как «сверху», так и «снизу».

Модифицированные функции Бесселя первого $I_n(X)$ и второго рода $K_n(X)$ нулевого и первого по-

рядка ($n=0;1$) являются хорошо изученными и весьма подробно затабулированы, например [9, 20].

При этом модифицированная функция Бесселя $K_1(X)$ может быть, как было отмечено ранее, представлена в сравнительно простом виде

$$K_1(X) = \frac{1 - XI_1(X)K_0(X)}{XI_0(X)}.$$

Выводы

В заключение следует отметить, что приведенные в данной статье расчетные зависимости применимы также в том случае, когда трапециевидное ребро вырождается в треугольное. Тогда безразмерные предельные координаты X_0 и X_1 станут соответственно равны 0 и 1. Естественно, что благодаря этому полученные в работе аналитические формулы будут существенно проще. Это, в частности, обусловлено характером математического поведения модифицированных функций Бесселя. Так, например, $K_1(X) \rightarrow \infty$ при $X \rightarrow 0$.

Кроме того, результаты выполненного исследования можно в определенной степени распространить на радиальные ребра рассмотренного профиля при условии, что цилиндрическая поверхность, к которой они присоединены, имеет относительно небольшую кривизну.

На основе предложенных граничных температурных функций можно также рассчитать предельные значения коэффициента тепловой эффективности трапециевидного ребра при лучистом теплоотводе с его поверхности.

Таблица. Результаты расчета нижнего и верхнего граничных значений безразмерной температуры вершины температурного ребра ($X=X_0=0,5$)

Table. Results of calculation of lower and upper boundary values of nondimensional temperature for the temperature rib peak ($X=X_0=0,5$)

Число Старка Sk Stark number Sk	$\mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X_0)$ по формуле (14) by the formula (14)	$\mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X_0)$ по формуле (32) by the formula (32)	$\mathcal{G}_{\text{наиб}}(X_0)$ по формуле (25) by the formula (25)
0,5	0,9333	0,9375	0,9383
1,0	0,8825	0,8925	0,8957
1,5	0,8395	0,8554	0,8632
2,0	0,8045	0,8251	0,8411

Из таблицы видно, что при умеренных величинах радиационного числа Старка (Sk) различия между $\mathcal{G}_{\text{наим}_1}(X_0)$ и $\mathcal{G}_{\text{наиб}}(X_0)$ очень мало. С ростом Sk эта разница становится несколько больше. Однако в процентном соотношении она остается сравнительно небольшой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 478 с.
2. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
3. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Изд-во Высшая школа, 1964. – 490 с.
4. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
5. Краснощекоев Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1975. – 280 с.
6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
7. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 461 с.
8. Логинов В.С. Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.
9. Видин Ю.В. Краткий справочник по теплообмену. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. – 170 с.
10. Видин Ю.В., Иванов В.В., Казаков Р.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 165 с.
11. Видин Ю.В., Казаков Р.В. Приближенный метод расчета изменения температуры в радиальном ребре // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 12–13.
12. Видин Ю.В., Казаков Р.В. Расчет распределения температуры в стержне при переменном коэффициенте теплоотдачи на его поверхности // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 22–24.
13. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 576 с.
14. Ватсон Г.Н. Теория Бесселевых функций. Ч. 2. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1949. – 220 с.
15. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Изд-во «Наука», 1977. – 342 с.
16. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
17. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 1100 с.
18. Никифоров А.Ф., Уваров В.Б. Специальные функции математической физики. – М.: Изд-во «Наука», 2007. – 344 с.
19. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Изд-во «Наука», 1964. – 772 с.
20. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. Лит., 1962. – 450 с.

Поступила 19.10.2014 г.

UDC 536.24

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A STRAIGHT TRAPEZOIDAL RIB WITH RADIANT HEAT REMOVAL FROM THE SURFACE

Yuri V. Vidin,

Siberian Federal University, 79, Svobony Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

E-mail: roman.kazakov@list.ru

Roman V. Kazakov,

Siberian Federal University, 79, Svobony Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

E-mail: roman.kazakov@list.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to reduce the weight and dimensions of high radiation heat exchange systems while improving their energy efficiency. This can be achieved by appropriate profiling ribbed elements. Such surfaces are widely used in various fields of modern technology. Therefore, the problems of radiative heat transfer of the developed surfaces are of special scientific and technical interest.

The main aim of the study is to obtain a rather simple analytical method from mathematical point of view for calculating the temperature distribution in the ribs of variable cross section in the radiative heat removal from the surface.

The methods: use of the proposed linearizing transformation that allows reducing the influence of the nonlinear term in the original differential equation of energy transfer.

The results. The authors have proposed the approximate mathematical method based on obtaining lower and upper bounds of the temperature field. This method has an engineering perspective, it is reasonably accurate and at the same time, it is rather simple. In this case, the first two approximations are enough. The calculations given in the article, for trapezoidal ribs may also be used in the particular case for wedge ribs. The found mathematical limits for estimating the upper and lower values of the temperature field allow estimating the coefficient of thermal efficiency for the ribbed surfaces at radial heat exchange.

Key words:

Temperature field, radiative heat exchange, trapezoidal ribbed surface, analytical method, modified Bessel function.

REFERENCES

1. Shneyder P. *Inzhenernye metody teploprovodnosti* [Engineering methods of thermal conductivity]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1960. 478 p.
2. Ekkert E.R., Dreyk R.M. *Teoriya teplo- i massoobmena* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1961. 680 p.
3. Shorin S.N. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1964. 490 p.
4. Isachenko V.P., Osipov V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 486 p.
5. Krasnoshchekov E.A., Sukomel A.S. *Zadachnik po teploperedache* [Collection of problems in heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 280 p.
6. Uong Kh. *Osnovnyye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov* [Basic formulas and data on heat transfer for engineers]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 216 p.
7. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverkhnosti teploobmena* [Developed heat exchange surfaces]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 461 p.
8. Loginov V.S. *Priblizhennyye metody teplovogo rascheta* [Approximate methods of thermal calculation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 270 p.
9. Vidin Yu.V. *Kratkiy spravochnik po teplomassoobmenu* [Short guide of Heat and Mass Transfer]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Press, 2007. 170 p.
10. Vidin Yu.V., Ivanov V.V., Kazakov R.V. *Inzhenernye metody rascheta zadach teploobmena* [Engineering methods of calculating heat transfer problems]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Press, 2014. 165 p.
11. Vidin Yu.V., Kazakov R.V. Priblizenny metod rascheta temperatury v radialnom rebre [An approximate method for calculating temperature change in the radial rib]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 12–13.
12. Vidin Yu.V., Kazakov R.V. Raschet raspredeleniya temperatury v sterzhne pri peremennom koefitsiente teplotodachi na ego poverkhnosti [Calculation of the temperature distribution in the rod with a variable heat transfer coefficient on the surface]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 22–24.
13. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam* [Handbook on Ordinary Differential Equations]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 576 p.
14. Watson G.N. *Teoriya Besselyevykh funktsiy* [Theory of Bessel functions]. Moscow. Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1949. P. 2, 220 p.
15. Yanke E., Emde F., Lesh F. *Spetsialnye funktsii* [Special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 342 p.
16. Abramovits M., Stigan I. *Spravochnik po spetsialnym funktsiyam* [Handbook of Mathematical Functions]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 830 p.
17. Gradshteyn I.S., Ryzik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Table of integrals, series and products]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963. 1100 p.
18. Nikiforov A.F., Uvarov V.B. *Spetsialnye funktsii matematicheskoy fiziki* [Special functions of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 344 p.
19. Ango A. *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov* [Mathematics for Electrical and Radio Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 772 p.
20. Segal B.I., Semendyaev K.A. *Pyatiznachnye matematicheskie tablitsy* [Five-figure mathematical tables]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1962. 450 p.

Received: 19 October 2014.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ($U_{пр.}$, Φ_i , но Al_2O_3 , $\cos\alpha_i$, max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

Петров Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

Иванов Андрей Андреевич, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

Ключевые слова: (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*


Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати 30.06.2015. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,52. Уч.-изд. л. 14,94.
Заказ 380-15. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru