ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№2 (8) 2017 г.

III Международная научно-практическая конференция

Инновационные перспективы Донбасса

III Международная научно-практическая конференция

Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса

VII Международная научно-техническая конференция

Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование

XVII Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов

Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых

III Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов

Металлургия XXI столетия глазами молодых

г. Донецк

24-26 мая 2017 г.

III МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Вестник ДонНТУ №2(8)'2017

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Артюх В. Г. (д.т.н., проф.)
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С. М. (д.т.н., проф.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Приседский В.В. (д.х.н., проф.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
** - штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон: +380 (62) 304-60-82
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2017. №2(8)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство
о государственной регистрации
№ 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати
по решению Ученого Совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №10 от 24.11.2017

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 1117.
Изд-во «Донецкая политехника», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

А.Е. Воробьев, М. Т. Мусса Махамат
Пути повышения технологической безопасности на магистральных нефтепроводах Республики Чад.....3

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Н.А. Ченцов, С.Л. Сулейманов, А.А. Истрати
Значение экспериментальной функции интенсивности износа в «серых» зонах 9

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И.А. Бершадский, В.В. Якимишина, В.Г. Данилов
Выбор регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств в сетях 0,4 кВ с нелинейными нагрузками 16

Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Д.О. Федюк
Измерение тока в замкнутом сверхпроводниковом контуре и магнитной восприимчивости слабомагнитных материалов.....23

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, Т.Г. Олешкевич
Адаптация математической модели процессов тепловой обработки металла в печах, учитывающей окалинообразование.....30

Н.И. Захаров, И.В. Тупилко, Е.В. Сапронова, И.В. Зябрев
Энергосберегающий режим интенсификации процессов тепломассопереноса при обработке жидкой стали порошковой проволокой 38

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Н.С. Лозинский, Л.Р. Куницкая
Процедура выявления альтернативного топлива и фальсификата автомобильного бензина.....44

А.Б. Бирюков, В.А. Семергей
Исследование параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела 51

С.Л. Хилько, Е.В. Щербакова
Влияние алифатических спиртов на реологические характеристики водоугольных суспензий.....57

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 63

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.

– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.

– Журнал распространяется бесплатно в печатном и эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.

– Журнал включен в «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru

– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru

– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU №2(8)'2017

international scientific-technical journal

Founder and publisher *Donetsk National Technical University (Donetsk)*

Editor-in-chief
Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief
Bulgakov Y.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Executive secretary
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurenny E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Prisedsky V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Chentsov N. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone: +380 (62) 304-60-82,
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2017. No. 2(8)

ISSN 2518-1653 (online)

Published since January, 2016
Publication frequency: 4 times a year

Certificate of State Registration
No.000133 dated 27 May, 2017

The content and originality of the articles is the author's responsibility. The editorial opinion may not necessarily represent the views of the authors.
The content of advertising material is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.10 dated 24.11.2017

Format 60×84$^{1/8}$. Order 1117.
Publishing house
"Donetsk Polytechnic",
2017

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

A.E. Vorobyov, M.T. Moussa Mahamat
The ways to improve process safety on the main pipelines of the Republic of Chad 3

ENGINEERING AND SCIENCE ENGINEERING

N.A. Chentsov, S.L. Suleimanov, A.A. Istrati
The value of experimental function of the intensity of wear in "gray" areas..... 9

ELECTRICAL ENGINEERING

I.A. Bershadsky, V.V. Yakimishina, V.G. Danilov
The selection of adjustable filter compensating devices in 0.4 kV networks with nonlinear loads.....16

D.V. Varyukhin, N.V. Taryanik, D.O. Fedyuk
The current measurement in a shorted superconducting circuit and magnetic susceptibility of sub-magnetic materials…….. 23

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev, T.G. Oleshkevich
Adaptation of the mathematical model of metal heat treatment in furnaces considering scale formation.....30

N.I. Zaharov, I.V. Tupilko, E.V. Sapronova, I.V. Zyabrev
Energy-saving intensification mode of heat and mass transfer in processing of molten steel with powder wire.....38

CHEMICAL TECHNOLOGY

N.S. Lozynsky, L.R. Kunitskaya
The procedure for identifying alternative fuel and adulteration of gasoline 44

A.B. Biryukov, V.A. Semergey
Studying the parametric sensitivity of the mathematical model for polyfractional torch burnout…… 51

S.L. Khil'ko, E.V. Shcherbakova
The influence of aliphatic alcohols on rheological characteristics of coal-water slurry…….. 57

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office……63

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
– The journal is included into "Russian Index of Science Citation" (RISC). Internet: elibrary.ru.
– The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology

УДК 614.8.084

А.Е. Воробьев /д.т.н./
ФГАОУДПО «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов топливно-энергетического комплекса» Минэнерго РФ (Москва)
М.Т. Мусса Махамат
Университет Дружбы Народов (Национальный университет Республики Чад)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ РЕСПУБЛИКИ ЧАД

Представлены результаты исследований по совершенствованию способов повышения безопасности на магистральных нефтепроводах Республики Чад. Первоначально рассмотрены нефтяные запасы Республики Чад, их географическое размещение и объемы. Даны характеристики магистрального нефтепровода, позволяющего транспортировать чадскую нефть к морскому терминалу вблизи г. Криби (Камерун). Идентифицированы возможные на магистральных нефтепроводах чрезвычайные ситуации и дана их типизация в зависимости от источника возникновения, масштаба, характера воздействия и тяжести последствий. Сведена частота отказов нефтепроводов непосредственно к характеру отказа или конкретному виду их повреждения, которые также получили дифференциацию по характеру разрушения тела нефтепровода. Разработаны специальные устройства, гасящие гидродинамические удары и тем самым препятствующие разрушению труб нефтепроводов.

Ключевые слова: *нефтепроводы, аварии, типизация, взаимосвязь аварий и разрушения нефтепроводов.*

В настоящее время прогнозные ресурсы нефти в Чаде оцениваются в 1 млрд. т, а доказанные запасы – 274 млн. т. Перспективы нефтегазоносности Чада связаны в первую очередь с нефтегазоносными бассейнами – Чадским и Доба (Шари), а также с нефтегазоносным бассейном Куфра. В районе Добы уже давно были разведаны богатые нефтяные месторождения: проектная добыча на них нефти составляет 400 тыс. баррелей в сутки, а запланированная эксплуатация – в течение 30-ти лет.

Для прокачки чадской нефти к экспортному терминалу близ г. Криби в Камеруне уже закончена прокладка 30-дюймового нефтепровода длиной 1078 км. Пропускная способность этого нефтепровода составляет 11 млн. т нефти в год. Приблизительно 170 км из общей протяженности транспортной системы (труба диаметром 760 мм, на глубине не менее 1 м) расположено в Чаде.

На основе анализа теоретических данных и практики эксплуатации нефтепроводного транспорта были идентифицированы возможные на магистральных нефтепроводах чрезвычайные ситуации (ЧС) и дана их типизация в зависимости от источника возникновения, масштаба, характера воздействия и тяжести последствий (табл. 1).

Для формализации последующих исследований и решения поставленных задач в работе

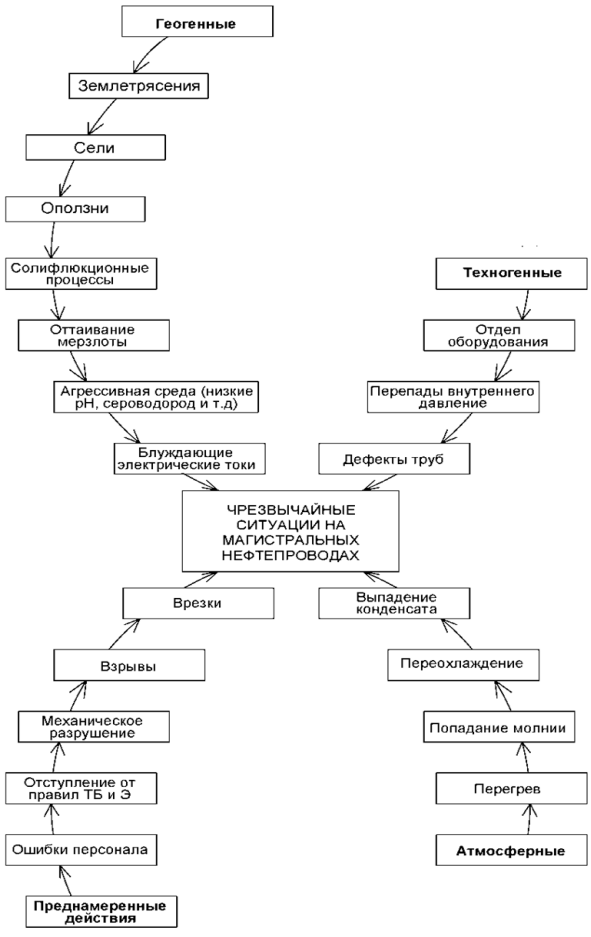


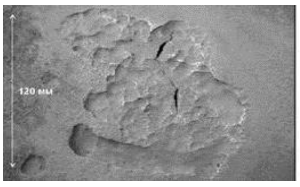
Рис. 1. Схема возможных причин возникновения ЧС на магистральных нефтепроводах

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Типизация ЧС на современных нефтепроводах

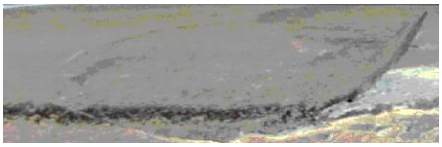
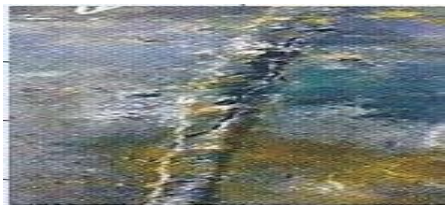
Место проявления ЧС	Почвы	Атмосфера	Гидросфера	Техногенная среда (промышленная агломерация)
Уровень ЧС	Местный, 100 тыс. долларов США, 500 т нефти	Региональный, 1 млн. долларов США, 1000 т нефти	Государственный,10 млн. долларов США, 10000 т нефти	Транснациональный, более 100 млн. долларов США, 10000 т нефти
Вид нарушения, обусловливающий ЧС	Образование отверстия	Разрыв тела трубы	Обрыв трубы	
Степень опасности	Низкая	Средняя	Высокая	
Характер ЧС	Выброс с нефтепровода	Пожар на нефтепроводе	Взрыв нефтепровода	
Перечень поражающих факторов	Химическое загрязнение	Тепловое поражение	Ударная волна	
Система критериев технологической безопасности	По интенсивности потока энергии	По абсолютному значению энергии	По концентрации (удельной и абсолютной) химических элементов	По токсичности химических элементов и веществ
Методы мониторинга состояния нефтепроводов	Путем мониторинга состояния			
	тела нефтепровода	атмосферы	гидросферы	почвенного покрова
Мероприятия инженерной защиты	Применение запорной арматуры	Использование стабилизаторов	Регулирование давления	
Мероприятия по ликвидации последствий ЧС	Сбор нефти	Рекультивация почв, земной поверхности и подземных вод	Биологическая рекультивация (высадка растений, кустарников и деревьев)	

Табл. 2. Частота аварий на магистральных нефтепроводах

Характер повреждения нефтепровода, частота аварий (событий×км$^{-1}$×год$^{-1}$)	Фото повреждения тела нефтепровода	Характер повреждения нефтепровода, частота аварий (событий×км$^{-1}$×год$^{-1}$)	Фото повреждения тела нефтепровода
Водородная коррозия тела труб, $2{,}6\times10^{-3}$		Одиночный коррозионный сквозной дефект, $2{,}4\times10^{-3}$	
Трещина в поперечном шве, $3{,}4\times10^{-4}$		Трещина в околошовной зоне продольного шва, $1{,}8\times10^{-4}$	
Усталостная трещина (разрыв) в стенке нефтепровода, $3{,}0\times10^{-5}$		«Гильотинный» разрыв (разрыв трубы на полное сечение), $7{,}12\times10^{-5}$	

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Виды заводских дефектов труб

Вид	Фотография
Дефект «риска» на поверхности трубы	
Характерные подрезы труб	
Кратеры в теле трубы нефтенефтепровода	
Сварной шов	

использовалась общая классификация возникновения чрезвычайных ситуаций, адаптированная авторами к проблемам нефтепроводного транспорта. В соответствии с классификацией действующие нефтепроводы подвержены воздействиям многообразных факторов различной природы (рис. 1), приводящих к их нарушениям и авариям

Многочисленными статистическими данными было установлено, что аварийность нефтепроводов напрямую зависит как от их линейной протяженности, диаметров и продолжительности эксплуатации, так и от технических ошибок персонала (вследствие образуемых перепадов давления), от свойств нефти (химического состава перекачиваемых флюидов), качества изготовления и сборки (монтажа) нефтепровода, а также физических и химических свойств металла труб.

Обработка статистических данных по работе нефтепроводов

В ходе дальнейших исследований стало необходимым привести частоту отказов нефтепроводов непосредственно к характеру отказа или конкретному виду их повреждения, которые также получили дифференциацию по характеру разрушения тела нефтепровода (табл. 2).

Осуществленный научный анализ аварий, имевшихся в процессе эксплуатации магистральных нефтепроводов, показал, что ключевыми факторами их возникновения, приводящими к последующей разгерметизации с выбросами нефтепродуктов в окружающую среду, являлись (табл. 3):

– недоброкачественное исполнение соединений при монтаже и деформирование металла тела нефтепровода (царапины, задиры или вмятины) из-за механических воздействий, появившиеся при его производстве. Так, по результатам ультразвуковой диагностики основными (более 50 %) дефектами являются дефекты проката, причем доминирующими (свыше 80 %) из них являются разнообразные неметаллические включения и утонения стенки трубы;

– нарушения металла тела труб (7–18 %) и пробоины в магистральных нефтепроводах;

– выполненные с нарушениями заводской сварки (21 %) трубные соединения, а также нарушения запорной арматуры, вантузов или манометрических устройств и швов конструкции нефтепроводов;

– коррозия тела труб нефтепроводов, проявляющаяся в виде язв или свищей (неравномерная внешняя, а также сплошная равномерная внутренняя коррозия).

– старение покрытия, обеспечивающего изоляцию, или некачественная изоляция при сооружении нефтепроводов;

– другие причины, в т.ч. технологические ошибки персонала при эксплуатации.

В период создания нефтепроводных систем возможны и различные дефекты сварных швов труб нитки нефтепровода, имеющие неравномерные ширину и высоту по длине шва, а также резкие переходы от шва к металлу тела трубы. При этом общая протяженность сварных швов, как показывают расчеты, в 1,5 раза превышает длину самого нефтепровода.

Кроме этого, частой причиной взрывов и аварий на трансафриканских нефтепроводах становятся самовольные врезки, которые зачастую осуществляет местное население Африки. Так, анализ ситуации показал, что аварийные разливы нефти, образовавшиеся в результате несанкционированных врезок в магистральные нефтепроводы, за последнее время в отдельных регионах Чада характеризовались максимальным количеством до 100 и наибольшей площадью загрязнения почвы до 65 га.

Исследование эффективности стабилизаторов гидравлических ударов

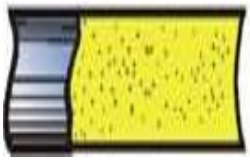
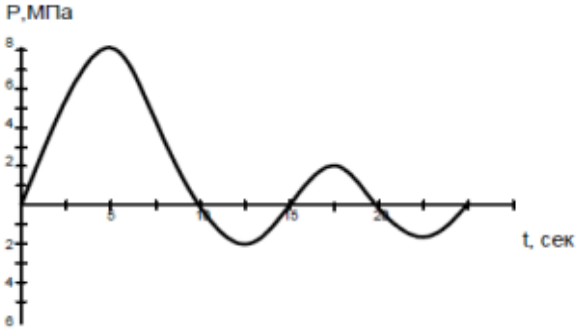
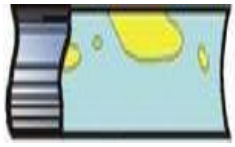
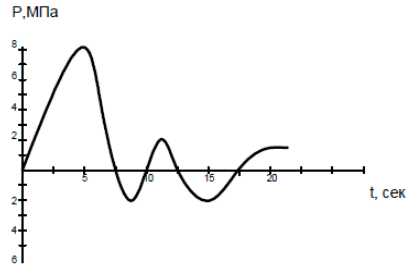
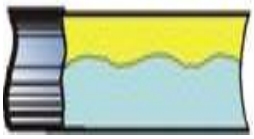
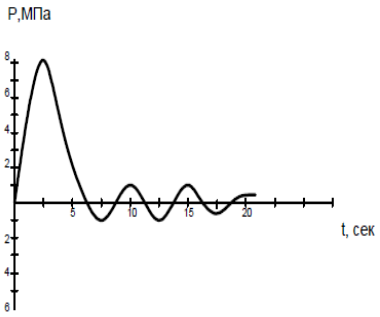
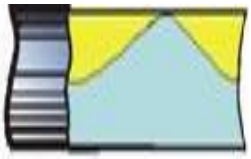
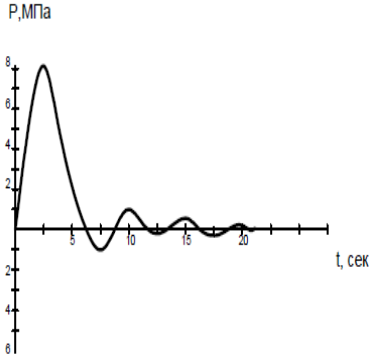
На аварийность также влияет значение пропускной способности магистральных нефтепроводов: зачастую в них возникает пробковый режим течения (табл. 4), зачастую расслоенный

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

(когда по нижней части нефтепровода транспортируется жидкость повышенной коррозионной активности, а над ней нефть и в верхней части трубы – газ). При этом по нижней образующей трубы нефтепровода обычно перемещается довольно значительное количество механических примесей.

Изменение гидравлических режимов работы магистральных нефтепроводов приводит к тому, что значительная их часть начинает испытывать не только статические (давление газожидкостной смеси) и малоцикловые (связанные с

Табл. 4. Конструктивные особенности стабилизаторов

Пробковые структуры, обуславливающие пульсацию давления	Стабилизаторы	Эффект
 дисперсная	Пневмостабилизаторы	 т, с
 пробковая	Стабилизаторы с сильфонами и упругими камерами	 т, с
 волновая	Стабилизаторы с двухфазной средой	 т, с
 снарядная	Многорежимные стабилизаторы	 т, с

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

периодическими изменениями загрузки нефтепроводов), но и циклические нагрузки. А масштаб последующего разрушения будет зависеть от глубины проникновения коррозии в стенки трубы нефтепровода и от силы гидравлического удара.

Все эти гидродинамические процессы (пульсации давления и вибрации, а также гидроудары), неизбежно возникающие при эксплуатации магистральных нефтепроводов, существенно усиливают существующие механизмы их разрушения, многократно ускоряя коррозионные процессы, способствуют накоплению усталостных характеристик металла, особенно в местах концентрации напряжений (сварные швы, задиры и т.п.), и являются основным фоном возникновения аварийных ситуаций.

Особенности гидравлических (кавитационных) ударов учитывают разработанные авторами стабилизаторы давления, принцип действия которых основан на распределенном по длине нефтепровода диссипативном и упругодемпфирующем воздействии на пульсирующий поток перекачиваемой среды:

– обеспечение безаварийной эксплуатации нефтепроводных систем и оборудования путем гашения до безопасного уровня амплитуд гидроударов, колебаний давления, вибраций и резонансных явлений;

– полное исключение крупных аварийных разрывов трубопроводов, выхода из строя арматуры и насосных агрегатов по причинам гидроударов, пульсаций давления и вибраций;

– увеличение коррозионно-усталостной долговечности труб за счет снижения до необходимого уровня амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления на рабочих частотах насосных агрегатов и при переходных режимах;

– предотвращение возможных разрушений нефтепроводов за счет применения стабилизаторов обеспечивается путем полного гашения или временным фазовым сдвигом амплитуды ударной волны, чем обеспечивают снижение в 5-10 раз количества и силы гидроударов, колебаний давления, вибраций и резонансных явлений.

При этом наибольший эффект гашения достигается при диссипации энергии пульсаций на перфорационных отверстиях, которые равномерно распределены по длине стабилизатора. Это достигается также вследствие демпфирования, обусловленного податливостью упругих элементов, которые выполнены в виде газовой подушки, емкостных камер или сильфонов со стенками из пружинистых и эластичных материалов.

Если у выходного сечения стабилизатора расположен быстродействующий отсечный клапан (задвижка), t_0 при $t<0$, движение среды происходит со скоростью υ_0. При $t=0$ клапан начинает закрываться, и при $t=\tau$ происходит полное перекрытие поперечного сечения магистрали.

Применяя преобразование Лапласа к функции $u(t)$, имеем:

$$u(s)=\frac{\upsilon_0}{\tau s^2}\left(e^{\ \tau s}-1\right).$$

На рис. 3 приведены графики функции $\tilde{F}(\tilde{t})$ для $\tilde{\tau}=0{,}75$ и различных значений $\tilde{\alpha}^*_{ct}$ и $\tilde{\beta}_{ct}$ (значение $\tilde{\beta}_{ct}=0$ соответствует использованию упругой камеры без перфорации). При увеличении $\overline{\alpha}^*_{ct}$ (главным образом при возрастании податливости стабилизатора) уменьшается значение максимума функции $\tilde{F}(\tilde{t})$, т.е. амплитуды гидравлического удара.

Наибольшее влияние на амплитуду и на скорость гашения пульсаций давления оказывает рациональный выбор параметра $\tilde{\beta}_{ct}$.

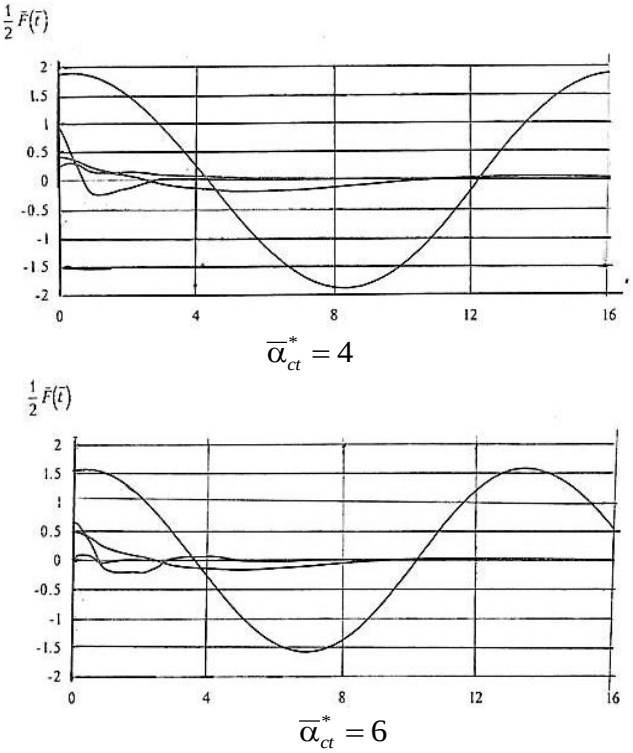


Рис. 3. Гидравлический удар в нефтепроводной системе ($\tilde{\tau}=0{,}75$) при различных значениях обобщенных параметров стабилизатора:
$1-\overline{\beta}_{ct}=0$ (упругая камера без перфорации);
$2-\overline{\beta}_{ct}=2$; $3-\overline{\beta}_{ct}=4{,}3$; $4-\overline{\beta}_{ct}=8$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Необходимо отметить, существует такое предельное значение $\tilde{\beta}_{ct}^{пред}$, что при дальнейшем увеличении $\tilde{\beta}_{ct} > \tilde{\beta}_{ct}^{пред}$ начинает возрастать значение максимума функции $\tilde{F}(\tilde{t})$.

Функция $\tilde{F}(\tilde{t})$ имеет следующий вид:

$$\tilde{F}(\bar{t}) = \sum_{n} \frac{\left[exp(\bar{s}_n \bar{t}) - exp(\bar{s}_n(\bar{t}-\tau))\right]}{\bar{\tau}\bar{s}_n^2 \left[1 + \frac{\bar{\alpha}_{ct}^*}{(1+\bar{\beta}_{ct}\bar{s}_n)^2} - \frac{(\bar{\alpha}_{ct}^*\bar{s}_n)^2}{(1+\bar{\beta}_{ct}\bar{s}_n)^2}\right]}.$$

Демпфирование гидравлических ударов достигается за счет многократного (до 50-60 раз на примере системы «вода-воздух») уменьшения скорости звука в газожидкостной смеси по сравнению с чистой жидкостью.

Отличительная особенность стабилизаторов давления заключается в том, что они имеют минимальное гидравлическое сопротивление: наибольшее применение получила конструктивная схема стабилизатора с равномерно распределенной перфорацией, через которую перекачиваемая среда может перетекать из нефтепровода в демпфирующую надстройку над перфорированной его частью.

Таким образом, в общем случае стабилизатор давления (как специальное включение в нефтепроводную систему) должен препятствовать распространению возмущений среды за счет упругодемпфирующего воздействия на поток, приводящего к перераспределению энергии в спектре колебаний и (или) за счет механического воздействия, вызывающего необратимые потери этой энергии.

Аналогичный эффект достигается также вследствие демпфирования, обусловленного податливостью упругих элементов, которые выполнены в виде газовой подушки, емкостных камер или сильфонов со стенками из пружинистых и эластичных материалов. Дополнительные эффекты гашения обеспечиваются при расширении потока в предкамерах и коллекторах стабилизатора, создании однонаправленного движения, т.е. за счет влияния на геометрию потока.

Таким образом, возможно продление (на 50-70 % с учетом накопленного износа и реальных условий эксплуатации) эксплуатационного ресурса даже сильно изношенных нефтепроводов за счет снижения динамических и циклических нагрузок.

Выводы

В результате проведенных исследований была предложена эффективная система предупреждающих, защитных и локализующих технических решений и организационно-технических мероприятий, позволяющих значительно повысить технологическую и экологическую безопасность и снизить риск возникновения аварий на магистральных нефтепроводах.

Список литературы

1. Воробьев, А.Е. Разработка технико-технологических мероприятий для предотвращения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на магистральных нефтепроводах Республики Чад / А.Е. Воробьев, М.Т. Мусса Махамат. – М.: Икар, 2012. – 328 с.
2. Воробьев, А.Е. Научные основы предотвращения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на магистральных нефтепроводах Республики Чад / А.Е. Воробьев, В.Г. Плющиков, М.Т. Мусса Махамат.– М.: РУДН, 2013. – 185 с.
3. Воробьев, А.Е. Организация работы по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций в странах Африки / А.Е. Воробьев, З.В. Лысенкова, М.Т. Мусса Махамат // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 2. – С. 68-72.

Сведения об авторах

А.Е. Воробьев
Телефон: +7 (906) 777-49-55
Эл. почта: fogel_al@mail.ru

М.Т. Мусса Махамат
Эл. почта: m.tahirmoussa.mht@mail.ru

Статья поступила 21.04.2017 г.
© А.Е.Воробьев, М.Т.Мусса Махамат, 2017

УДК 658.58, 669.02.004.5

Н.А. Ченцов /д.т.н./, С.Л. Сулейманов, А.А. Истрати
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЗНАЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА В «СЕРЫХ» ЗОНАХ

Предложен подход и разработан математический аппарат к его реализации, обеспечивающий определение интенсивности изменения технического состояния в «серых» зонах. В разработанном подходе оценки интенсивность в «серой» зоне определяется из сравнения значений интенсивности на двух участках истории, ближайших к «серой» зоне, и средней с учетом поправочного коэффициента, определяемого из поверхности, отражающей его зависимость от степени изменения интенсивности на участке истории и относительной оценки неиспользованной части ресурса детали по величине ТС «серой» зоны.

Ключевые слова: *ТОиР, прогноз отказов, интенсивность изменения технического состояния, крайние точки функции.*

Постановка проблемы

В основе диагностической прогнозной модели лежит функция, отражающая зависимость интенсивности изменения технического состояния детали от его текущего значения. Традиционный метод построения этой функции из истории изменения технического состояния не позволяет получить значения интенсивности в «серых» зонах, соответствующие новой детали и детали, достигшей предельного технического состояния.

Прогнозирование сроков отказа деталей оборудования [1,2,3,4] на основе данных о его текущем техническом состоянии (ТС) Y предполагает использование функции, отражающей зависимость интенсивности I изменения ТС оборудования от текущего ТС, $I=f(Y)$. Традиционный подход к построению функции $I=f(Y)$, выполняемый на данных истории изменения ТС, $Y=f(t)$, предполагает линейную аппроксимацию между точками истории [5], что не позволяет определить значение I для новой детали и детали, достигшей предельного ТС. Необходимо разработать решение, обеспечивающее определение интенсивности в предельных точках, соответствующих новой детали и детали, достигшей предельного ТС.

Анализ последних исследований и публикаций

При прогнозировании сроков отказа деталей оборудования на основе данных о ТС детали [6,7] используется функция, отражающая зависимость интенсивности I изменения ТС детали от текущего ТС, $I=f(Y)$. Исходными данными к определению экспериментальных точек интенсивности одной реализации детали является история изменения ее ТС, $Y=f(t)$ [8,9]. Для определения интенсивности в j-й точке истории используется отношение разностей: $(Y_{S.J+1}–Y_{S.J})$ к $(t_{S.J+1}–t_{S.J})$, где Y_S, t_S – параметры заданной точки в истории изменения ТС.

Значение ТС Y в j-й точке интенсивности составит половину суммы $(Y_{S.J+1}+Y_{S.J})$.

Необходимо отметить, что полученные точки интенсивности находятся между точками истории по значению Y. Использование приведенного решения не позволяет определить значение интенсивности в «серых» зонах при $Y<Y_1$ и $Y>Y_{N-1}$, где N – количество точек в истории изменения ТС на рассматриваемой реализации.

На графическом представлении функции $I=f(Y)$ можно видеть экспериментальные точки и «серые» зоны, в которых невозможно определить I принятым традиционным методом.

Таким образом, непосредственное использование точек истории не позволяет определить значения интенсивности изменения ТС в «серой» зоне, в том числе и в крайних точках: нулевой, при $Y_0=Y_0$; предельной, при $Y_P=Y_N$.

Отсутствие значений интенсивности в «серой» зоне не позволяет использовать диагностические прогнозные модели в этих условиях.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка метода и математического аппарата для определения из истории изменения ТС значений интенсивности в «серых» зонах, соответствующих новой детали и детали, достигшей предельного состояния.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основной материал исследования

Практическое решение задачи по определению интенсивности в крайних точках, при Y_0 и Y_P, выполняется из анализа истории изменения ТС детали, представленной функцией $Y=f(t)$. В рамках разработки метода определения интенсивности в крайних точках используется истинная функция интенсивности I_H (заданная исследователем) и расчетная I (полученная из истории, сгенерированной на основе I_H).

Исходные данные к выполнению исследований представлены заданной функцией интенсивности $I=f(Y)$, для которой известны значения интенсивности в крайних точках $Y0$, YP. Используя функцию $I=f(Y)$, выполняется генерация заданного количества N точек истории изменения ТС, $Y=f(t)$.

В рамках проведенного исследования рассмотрено определение интенсивности в нулевой точке (Y_0) для некоторой (базовой) заданной реализации детали, ключевыми характеристиками которой приняты:

- объем истории N=30;
- истинная (заданная) функция интенсивности $I_H=f_H(Y)$ представлена табл. 1, включающей данные по 100 точкам;
- интенсивность в нулевой точке при Y_H=0 составляет $I_{H.0}$=0,41 (табл. 1).

Задача разработки метода определения интенсивности в нулевой точке из истории изменения ТС базовой реализации детали выполняется в пять этапов.

Этап 1. Формирование экспериментальной истории изменения ТС базовой реализации, включающей 30 точек. Определяется шаг истории по времени:

$$dT=(T_H[99]-T_H[0])/(N-1)=(358{,}77-0)/(30-1)=12{,}37 \text{ суток.}$$

Для очередной h-й точки экспериментальной истории определяется срок ее достижения, например, в случае 2-й точки $(h=2)$:

$$Tp=Th[h]=h\cdot dT=2\cdot 12{,}37=24{,}74 \text{ суток.}$$

Затем в табл. 1 определяется точка i=16, удовлетворяющая условию $Tp>T_H[i]$ и соответствующая интенсивности изменения ТС:

$$sI=(Y_H[i]-Y_H[i\text{-}1])/(T_H[i]-T_H[i\text{-}1])=(3{,}4343-3{,}2323)/(27{,}86-24{,}73)=0{,}0645.$$

Далее рассчитывается ТС детали Yp в момент времени Tp:

$$Yp=Y_H[i]-sI\cdot(T_H[i]-Tp)=3{,}4343-0{,}0645\times(27{,}86-24{,}74)=3{,}233.$$

В результате имеем данные экспериментальной истории во 2-й точке: $Yh[2]=Yp=3{,}233$, $Th[2]=Tp=24{,}74$ суток.

Рассчитанные данные экспериментальной истории во второй и всех прочих точках приведены в табл. 2.

Табл. 1. Истинная функция интенсивности и истории изменения ТС

№ точки (i)	Y_H	I_H	T_H
0	0	0,409999996	0
1	0,202020198	0,35530597	0,529822469
2	0,404040396	0,308582693	1,140535649
3	0,606060594	0,268681645	1,842831286
4	0,808080792	0,234618306	2,648255606
5	1,010100991	0,205548882	3,569098381
6	1,212121189	0,180750325	4,618218879
7	1,414141387	0,159603268	5,8088014
8	1,616161585	0,141577184	7,154037912
9	1,818181783	0,126217812	8,666741866
10	2,020201981	0,113136306	10,35890645
11	2,222222179	0,101999842	12,24123004
12	2,424242377	0,092523672	14,32264137
13	2,626262575	0,084464215	16,60986277
14	2,828282773	0,077613182	19,10705329
15	3,030302972	0,071792506	21,81556842
16	3,23232317	0,066850007	24,73386382
17	3,434343368	0,062655665	27,8575549
18	3,636363566	0,059098445	31,17962775
19	3,838383764	0,056083523	34,69077779
20	4,040403962	0,053529985	38,37984306
. . .	. . .	. . .	. . .
96	19,39393902	0,268681556	356,928284
97	19,59595922	0,308582604	357,6305798
98	19,79797941	0,35530588	358,2412932
99	19,99999961	0,409999877	358,7711158

Табл. 2. Экспериментальная история изменения ТС по базовой реализации

№ точки (h)	Yh	Th
0	0	0
1	2,234858102	12,37141779
2	3,232903405	24,74283557
3	3,971097874	37,11425336
4	4,602614452	49,48567114
5	5,177863818	61,85708893
6	5,721552667	74,22850671
. . .	. . .	. . .
28	17,7651418	346,399698
29	19,99999961	358,7711158

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Точки экспериментальной интенсивности

№ точки (h)	Y	I
(0) 0	**0**	**0**
1	1,117429051	0,180646886
2	2,733880753	0,080673478
3	3,602000639	0,059669351
4	4,286856163	0,051046419
5	4,890239135	0,046498257
. . .	. . .	. . .
14	9,504940521	0,040026829
(*E*) 15	**9,999999992**	**0,04000595**
16	10,49505946	0,040026829
. . .	. . .	. . .
26	15,7131438	0,051046418
27	16,39799931	0,059669349
28	17,26611916	0,080673476
29	18,88257071	0,180646863
(*P*) 30	**20**	**0**

Этап 2. Расчет экспериментальных значений точек интенсивности изменения ТС детали. При расчете значений интенсивности используются данные *Yh*, *Th* из истории изменения ТС (см. табл. 2). Значение интенсивности в очередной *j*-й точке, например, *j*=2:

$$I[j]=(Yh[j]–Yh[j–1])/(Th[j]–Th[j–1])=$$
$$=(3{,}233–2{,}235)/(24{,}74–12{,}37)=0{,}0807.$$

Значению интенсивности $I[j]$ соответствует значение ТС Y в *j*-й точке:

$$Y[j]=(Yh[j]+Yh[j–1])/2=(3{,}233+2{,}235)/2=$$
$$=2{,}734.$$

Рассчитанные экспериментальные значения интенсивности во второй и прочих точках, определенные традиционным методом, приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, традиционный подход не позволяет определить интенсивность в крайних точках, в том числе и нулевой.

Этап 3. Определение интенсивности в крайней (нулевой) точке. Для определения интенсивности в нулевой точке можно использовать традиционный метод экстраполяции. Экстраполяция выполняется с использованием аппроксимирующей функции, параметризация которой осуществляется с использованием данных точек экспериментальной интенсивности (см. табл. 3). Аппроксимация точек для различных видов функций выполнена с использованием средств электронной таблицы. В зависимости от вида аппроксимирующей функции использовались данные 1-й, 2-й и других точек из табл. 3. Результаты аппроксимирующими моделями для различных видов функций приведены в табл. 4.

Этап 4. Определение интенсивности в нулевой точке. Выполнив на основе полученных аппроксимирующих функций экстраполяцию за пределы экспериментальных точек, определяем интенсивность $I0$ в нулевой точке (см. табл. 4).

Графическое представление полученных функций и значений интенсивности в 0-й точке, рассчитанных традиционным методом экстраполяции, показаны на рис. 1.

Этап 5. Определение ошибки. Ошибка определялась из сравнения значения интенсивности в 0-й точке при $Y=0$ и экспериментально полученного методом экстраполяции для каждой аппроксимирующей модели:

$$\Delta=(I_{II}0–I0)/2,$$

где $I_{II}0$ – истинное значение интенсивности в 0-й точке; $I0$ – экспериментальное значение интенсивности в 0-й точке, полученное методом экстраполяции для принятой аппроксимирующей модели.

Табл. 4. Интенсивность в 0-й точке, определенная традиционным методом

№ пп	Функция	Точки	Аппроксимирующая модель	$I0$	Δ, %
1	Истинная	-	-	0,41	0
2	Полин4-й	1..5	$I=0{,}0002Y^4–0{,}0048Y^3+0{,}0433Y^2–0{,}1785Y+0{,}3324$	0,332	23,49
3	Полин5-й	1..6	$I=3E–05Y^5–0{,}0003Y^4–0{,}0017Y^3+0{,}0337Y^2–$ $–0{,}1649Y+0{,}3256$	0,326	25,77
4	Полин3-й	1..4	$I=–0{,}0024Y^3+0{,}0332Y^2–0{,}1612Y+0{,}3227$	0,323	26,94
5	Экспоненц.	1..2	$I=0{,}3154e^{-0{,}499Y}$	0,316	29,75
6	Полин2-й/3т	1..3	$I=0{,}0152Y^2–0{,}1202Y+0{,}2961$	0,296	38,51
7	Поли2-й/5т*	1..5	$I=0{,}0145Y^2–0{,}1169Y+0{,}2747$	0,275	49,09
8	Линейный	1..2	$I=-0{,}0618Y+0{,}2498$	0,250	64,00

*Условное наименование функции «Полин2-й/5т» – полином 2-й степени из аппроксимации (1..5) точек

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

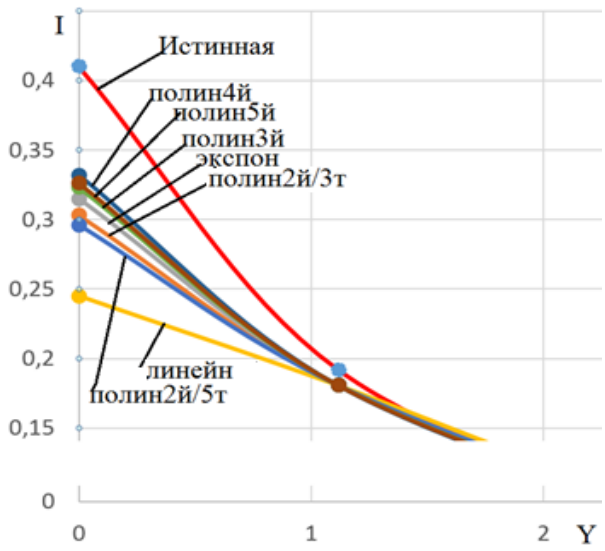


Рис. 1. Экстраполяция функции в 0-ю точку традиционным методом

Полученные значения ошибки приведены в табл. 4. Как видно из таблицы, использование традиционного подхода к определению интенсивности в 0-й точке на основе аппроксимирующей функции приводит к значительным ошибкам и неприемлемо для практического применения.

Для повышения точности определения экспериментального значения интенсивности в 0-й точке (*I*0, *Y*0) предложено собственное решение 4-го этапа задачи – «Определение интенсивности в нулевой точке». В разработанном решении в качестве исходных данных использованы следующие значения:

– значения экспериментальной интенсивности в 1-й (*I*1, *Y*1) и 2-й (*I*2, *Y*2) точках, в точке экстремума (*IE*, *YE*) (см. табл. 3);

– I_H0 – истинное значение интенсивности в 0-й точке.

Использование значений в этих точках позволило построить две линейные функции и определить относительную скорость изменения интенсивности *V*1, *V*2 (рис. 2).

На основании значений принятых точек истории интенсивности определяем средние скорости ее изменения на интервале *(Y*1 . . *YE)*:

$$V1=(I1-IE)/(YE-Y1)=$$
$$=(0,1806-0,0400)/(10-1,117)=0,0158,$$

и на интервале *(Y*2..*YE)*:

$$V2=(I2-IE)/(YE-Y2)=$$
$$=(0,0807-0,0400)/(10-2,7339)=0,0056.$$

Предложенная модель к определению экспериментального значения интенсивности в нулевой точке *I*0 включает полученные скорости *V*1, *V*2:

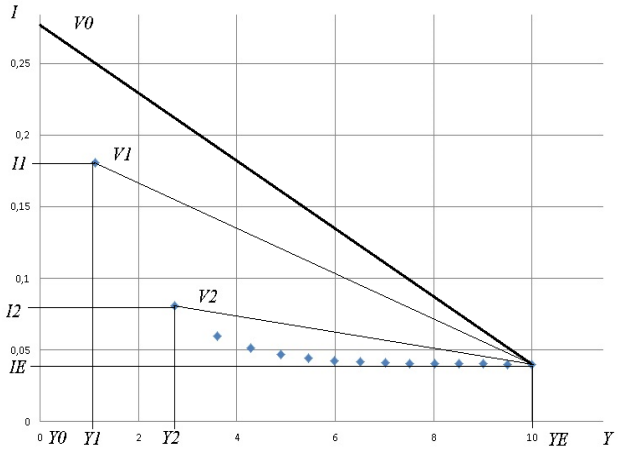


Рис. 2. Собственный метод определения интенсивности в 0-й точке

$$I0=IE+(YE-Y0)\cdot kV\cdot V1^2/V2,$$

где *kV* – экспериментальное значение поправочного коэффициента к определению скорости *I*0 изменения интенсивности.

Из этой модели, используя истинное значение интенсивности I_H0 в 0-й точке, можно определить истинное значение поправочного коэффициента:

$$kV_H=V2\cdot(I_H0-IE)/((YE-Y0)\cdot V1^2)=$$
$$=0,0056\cdot(0,41-0,0400)/((10-0)\cdot 0,0158^2)=0,826.$$

Далее, в рамках проверки полученного значения истинного поправочного коэффициента, принимаем экспериментальное значение поправочного коэффициента *kV* равным истинному ($kV=kV_H$). Затем из предложенной модели определяем экспериментальную интенсивность в 0-й точке:

$$I0=0,0400+(10-0)\cdot 0,826\cdot 0,0158^2/0,0056)=0,41.$$

Равенство значений $I_H0=0,41$ и $I0=0,41$ позволяет говорить о достоверности полученного значения kV_H.

Для построения зависимости значений kV_H от значений в точках экспериментальной интенсивности (см. табл. 3) был выполнен поиск информативных факторов. Первоначальные исследования позволили выделить фактор *factI*, который коррелируется с поправочным коэффициентом kV_H. Значение фактора *factI* определяется из выражения и в случае базовой реализации составляет:

$$factI=I1/IE=0,1806/0,0400=4,5156.$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 5. Результаты 2-факторного эксперимента для 0-й точки

№ реализации	*N*, кол-во точек	Из исследования истории			Из модели		Истинная, I_H0	$\Delta I0$, %
		factY	*factI*	kV_H	*kV*	*I*0		
1	30	0,0350	1,0191	0,7887	0,8222	0,04	0,0410	0,0000
2	30	0,0397	1,1843	0,7667	0,8069	0,05	0,0505	0,0005
3	30	0,0486	1,5129	0,7577	0,7852	0,07	0,0711	0,0011
4	30	0,0592	1,9363	0,7493	0,7711	0,10	0,1017	0,0017
5	30	0,0990	3,8034	0,7916	0,8083	0,30	0,3055	0,0055
базовая	**30**	**0,1117**	**4,5155**	**0,8260**	0,8399	**0,41**	**0,4162**	**0,0062**
6	30	0,1200	5,0127	0,8540	0,8623	0,50	0,5045	0,0045
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
20	70	0,0220	1,6278	0,8834	0,9040	0,07	0,0707	0,0007
21	70	0,0282	2,1928	0,8652	0,8824	0,10	0,1012	0,0012
22	70	0,0556	5,0787	0,8325	0,8460	0,30	0,3042	0,0042
23	70	0,0724	7,1940	0,8384	0,8534	0,50	0,5082	0,0082
24	70	0,0845	8,9027	0,8610	0,8626	0,70	0,7012	0,0012
25	70	0,0897	9,6718	0,8672	0,8657	0,80	0,7987	-0,0013

Аналогичным образом были получены значения kV_H и *factI* для I_H0 в интервале (0,041..0,8), что позволило получить функцию $kV_H=f(factI)$. Исследование полученной функции показало значительную ошибку в определении экспериментальной интенсивности *I*0 в 0-й точке, которая достигала 22 %, что неприемлемо в практическом применении.

Дальнейшие исследования позволили выделить второй фактор *factY*, значение которого определяется из выражения:

$$factY=(Y1-Y0)/(YE-Y0).$$

В случае базовой реализации значение этого фактора составит:

$$factY=(1,1174-0)/(10-0))=0,1117.$$

Результаты анализа интенсивности изменения ТС истинной реализации детали (*N*=30 точек, I_H0=0,41) в случае 2-факторного эксперимента *kV=f(factY, factI)* приведены в табл. 5 в 6-й реализации (базовой).

С использованием аналогичного математического аппарата выполнен анализ и других реализаций при объемах истории *N*=(30; 50; 70) точек и истинных значениях интенсивности в нулевой точке I_H0=(0,041; 0,05; 0,07; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,8), табл. 5.

С использованием программного продукта TableCurve 3D v4.0 выполнена аппроксимация поверхностью, представленной двумя аргументами *factY, factI* и откликом *kV* по всем реализациям, что позволило получить функцию *kV=f(factY, factI,* представленную выражением:

$$kV=1,0337839-9,0459504\cdot factY+$$
$$+0,017364727\cdot factI+61,649467\cdot factY^2-$$
$$-0,0031395952\cdot factI^2+0,62678426\cdot factY\cdot factI-$$
$$-71,207555\cdot factY^3+0,00011033024\cdot factI^3-$$
$$-0,009714248\cdot factY\cdot factI^2-3,053907\cdot factY^2\cdot factI.$$

Графическое представление поверхности *kV=f(factI, factY*) для 0-й точки приведено на рис. 3.

Используя полученную функцию *kV=f(factY, factI*) для случая базовой реализации, при *n*=30, *factI*=4,5155, *factY*=0,1117, получаем значение поправочного коэффициента *kV*=0,8272 и расчетное экспериментальное значение интенсивности в нулевой точке:

$$I0=IE+(YE-Y0)\cdot kV\cdot V1^2/V2=$$
$$=0,0400+(9,9991-0)\cdot 0,399\cdot 0,0158^2/0,0056=$$
$$=0,4162.$$

Корректированные расчетные значения, полученные при определении интенсивности *I*0 в нулевой точке, приведены в группе полей «Из модели» в строке базовой реализации (I_H0=0,41*; N*=30) (см. табл. 5).

Кроме базовой реализации аналогичные эксперименты были проведены по ряду других реализаций при объемах истории *N*=(30; 50; 70) точек и истинных значениях интенсивности в нулевой точке I_M0=(0,041; 0,05; 0,07; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,8), см. табл. 5. Как видно из результатов исследований, предложенный подход к определению экспериментальной интенсивности в нулевой точке *I*0 и разработанный математический аппарат обеспечили расчетное (экспериментальное) значение *I*0 с ошибкой не более 5 %, что позволяет рекомендовать их к практическому

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

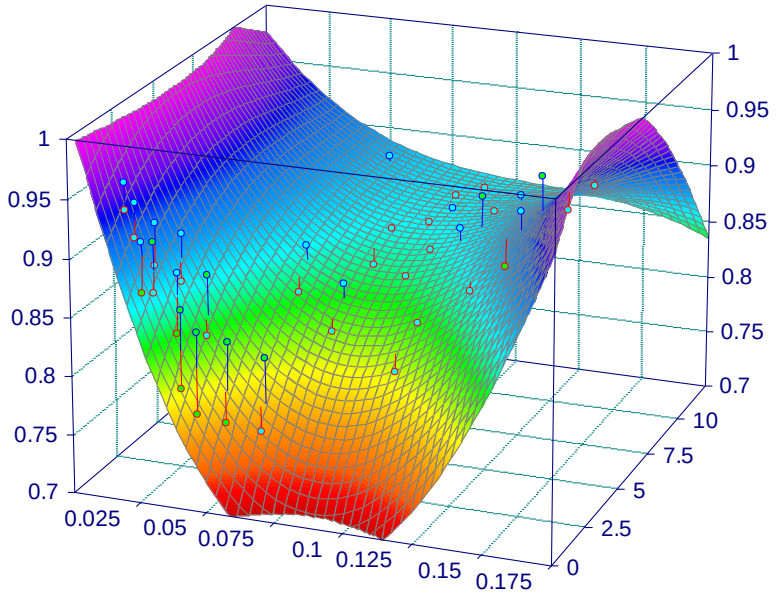


Рис. 3. Поверхность функции *kV=f(factY, factI)* для 0-й точки

использованию.

Аналогичные исследования были проведены для определения интенсивности в предельной *P*-й точке, которые также показали ошибку менее 5 %.

Выводы

Исходные данные к исследованию представлены заданной функцией, отражающей истинную зависимость интенсивности изменения ТС детали от ее текущего значения $I_H=f_H(Y)$, с использованием которой генерировалась история изменения ТС, представленная функцией $Y=f(t)$.

С использованием традиционного подхода из истории $Y=f(t)$ определяется экспериментальная интенсивность $I=f(Y)$ с «серыми» зонами, соответствующими новой детали и детали, достигшей предельного состояния, в которой значение интенсивности не определено.

Предложенное решение обеспечивает получение оценки интенсивности в «серой» зоне из сравнения значений интенсивности на двух участках истории, ближайших к «серой» зоне, и средней с учетом поправочного коэффициента, определяемого из поверхности, отражающей его зависимость от степени изменения интенсивности на участке истории и относительной оценки неиспользованной части ресурса детали по величине ТС «серой» зоны.

Список литературы

1. Войтюк, В. Д. Обоснование вида закона распределения показателей безотказности сельскохозяйственной техники / В.Д. Войтюк, В.В. Дидур, А.В. Невзоров // Вісник українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. – 2014. – № 2. – С.149-157.
2. Analysis of the Impact of Surface Layer Parameters on Wear Intensity of Friction Pairs: [Electronic resource] / R. Burdzik [et al.]. – Access mode: https://www.degruyter.com/view/j/amm.2012.57.issue-4/v10172-012-0110-8/v10172-012-0110-8.xml.
3. Brezinová, J. The Wear of Injection Mould Functional Parts In Contact With Polymer Composites: [Electronic resource] / J. Brezinová, A. Guzanová. – Access mode: http://fstroj.uniza.sk/journal-mi/PDF/2009/05-01.pdf.
4. Stamboliska, Z. Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines / Z. Stamboliska, E. Rusiński, P. Moczko // Springer. – 2015. – P.74-76.
5. Тарасова, С.В. Методика исследования результатов взаимодействия протектора с наклонной опорной поверхностью в режиме варьирования углами увода пневматических шин. С.В. Тарасова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2 (52) – С.84-87.
6. Богдан, К.С. Интегральная модель прогнозирования даты отказа / К.С. Богдан, С.Л. Сулейманов // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 4. – С.45-49.
7. Ченцов, Н.А. Программная реализация генератора изменения технического состояния детали оборудования. / Н.А. Ченцов, С.Л. Сулейманов // Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2015. – Том 3. – С.60-63.
8. Износ деталей машин: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mydocx.ru/11-53351.html.
9. Wireman, T. Developing Performance Indicators for Maintenance / T.Wireman. – NY: Industrial Press, 2005. – 341 p.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

N.A. Chentsov /Dr. Sci. (Eng.)/, S.L. Suleimanov, A.A. Istrati
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE VALUE OF EXPERIMENTAL FUNCTION OF THE INTENSITY OF WEAR IN "GRAY" AREAS

Background. *Predicting the term of equipment failure based on its current technical condition (TC) Y involves the use of a function reflecting the dependence of the intensity I change from the current TC I=f(Y). The traditional approach to the construction of a function z=f(Y) executed on TC data change history Y=f(t) involves a linear approximation between the points of history that does not allow determining the value of I for the new part and the part that has reached the limit TC. It is necessary to develop a solution that ensures determining intensity at the limit points corresponding to new parts and parts that have reached the limit TC.*

Materials and/or methods. *The objective of this paper is to develop a method and a mathematical apparatus to determine, from the history of changes in TC, the intensity in "gray" areas corresponding to new parts and the parts that have reached a limit condition. Using a simulation model, based on the true intensity function, the formation of the history of the parts technical condition changes is made. From the history obtained on the basis of data of its two adjacent points, the intensity of change of the TC outside "gray" areas determined. Using the traditional approximation of the received points and extrapolation into a "gray" area the values of intensity calculated. Extrapolation was performed using exponential functions and polynomials of various degrees. In the best case, when using a polynomial of the 4th degree, the accuracy was 17 %, which is unacceptable for engineering calculations. To improve the accuracy, the statistical research conducted for various cases of the initial intensity of wear. As a result, proposed the model to determine the estimated intensity at the border of the "gray" area:* $I0=IE+(1.0337839–9.0459504\cdot factY+0.017364727\times \times factI+61.649467\cdot factY^2 0.0031395952\cdot factI^2+0.62678426\cdot factY\cdot factI 71.207555\cdot factY^3+0.00011033024\times \times factI^3–0.009714248\cdot factY\cdot factI^2–3.053907\cdot factY^2\cdot factI)*(YE–Y0)*V1^2/V2$, *the parameters of which are determined from the history of changing the parts technical condition. Verification of the model showed an error less than 5 %.*

Results. *The research conducted and a mathematical model developed to determine, based on the change of TC, the intensity changes at the beginning and at the limit point of TC.*

Conclusion. *The function of the intensity change of parts TC studied and the model proposed to determine the values corresponding to the new parts and the parts that have reached the limit condition. The application of the refined function of intensity as a component of the projection model using the data on the technical condition of parts ensures the improved accuracy of prediction of the parts failure time.*

Keywords: *maintenance, failure prediction, intensity change of technical condition, extreme points of the function.*

Сведения об авторах

Н.А. Ченцов
SPIN-код: 1855-3909
Телефон: +380 (50) 990-41-26
Эл. почта: cheneam7@gmail.com

А.А. Истрати
SPIN-код: 4795-8844
Телефон: +380 (95) 595-95-30
Эл. почта: ctrl.break.pause@gmail.com

С.Л. Сулейманов
Телефон: +380 (95) 488-64-47
Эл. почта: nugnas@gmail.com

Статья поступила 18.03.2017 г.
© Н.А. Ченцов, С.Л. Сулейманов, А.А. Истрати, 2017
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 621.316.722.076.12

И.А. Бершадский /д.т.н./, В.В. Якимишина /к.т.н./, В.Г. Данилов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ВЫБОР РЕГУЛИРУЕМЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЕТЯХ 0,4 КВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

В данной работе показана проблема ухудшения качества электроэнергии в современных промышленных и бытовых распределительных сетях 0,4-10 кВ. Разработан алгоритм рационального выбора силового оборудования для регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, распределительные сети, фильтрокомпенсирующее устройство.*

Постановка проблемы

Ухудшение качества электроэнергии – одна из проблем современного электроснабжения. В России ГОСТ Р 54149-2010 регламентирует тринадцать показателей качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения.

Сложившаяся сегодня практика регулирования качества электроэнергии, как правило, ограничивается контролем двух показателей: отклонение напряжения и частоты. При этом меньшее внимание уделяется нормированию показателей, связанных с высшими гармониками тока и напряжения.

Основными источниками гармоник искажений в сети являются нагрузки крупных промышленных потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы.

Но в последние годы наблюдается значительное ухудшение качества электроэнергии и в городских распределительных сетях 0,4-10 кВ. Это объясняется увеличением доли нелинейной нагрузки коммерческих и офисных потребителей.

Примеры нелинейных нагрузок:

– промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители);

– преобразователи частоты для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока;

– источники бесперебойного питания;

– офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.);

– бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы);

– некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

Ухудшение качества электроэнергии в распределительных сетях характерно для большинства развитых стран и приводит к серьезным отрицательным последствиям, основными из которых являются следующие:

1. Увеличение потерь при передаче и распределении электроэнергии за счет дополнительного нагрева обмоток высокочастотными гармониками и сердечниками трансформаторов вихревыми токами.

2. Искажение формы кривой напряжения активизирует возникновение и протекание ионизационных процессов в изоляции электрических машин, трансформаторов и кабелей, что приводит к увеличению диэлектрических потерь и снижению срока службы электрооборудования, увеличению случаев аварий в кабельных сетях, вызванных ускоренным старением изоляции.

3. Увеличение капитальных вложений, вызванное преждевременной заменой оборудования и необходимостью проведения комплекса организационно-технических мероприятий по повышению качества электроэнергии.

4. Ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики из-за высокочастотных электромагнитных помех.

5. Неправильная работа измерительных приборов и приборов учета электроэнергии (ошибка может достигать 10 %).

6. Неисправности в работе чувствительного электронного оборудования (компьютеры, принтеры и т. д.). Из-за провалов и бросков несинусоидальной формы напряжений и токов.

7. Мерцание источников света (фликер) с низкочастотным колебанием напряжения, что приводит к физиологической усталости зрения человека.

8. Перегрузка нулевых проводников токами третьей гармоники.

Анализ последних исследований и публикаций

В работе [1] рассмотрены причины и последствия ухудшения качества электроэнергии в по-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

следние годы, а также классические методы решения этой проблемы в общих чертах. В научных работах [2-4] рассматриваются разновидности схем пассивных фильтров гармоник (ПФГ) и их перспективы. В публикациях [5-7] рассмотрены вопросы расчета и моделирования статического тиристорного компенсатора (СТК) для специфических потребителей.

Данная работа посвящена расчету и корректному выбору конденсаторных батарей и индуктивных реакторов для регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) и является продолжением указанных исследований.

Цель (задачи) исследования

Оптимизация алгоритмов улучшения качества электроэнергии и стабильности энергосистемы с высоким уровнем нелинейной нагрузки с помощью регулируемых ФКУ.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать качество электроэнергии в распределительных сетях 0,4-10 кВ, исследовать компенсационные характеристики различных схем и видов регулируемых ФКУ, разработать алгоритмы расчета с последующим выбором компонентов регулируемого ФКУ, промоделировать статические и динамические характеристики энергосистемы.

Основной материал исследования

Основным средством ослабления высших гармоник в системах электроснабжения являются силовые фильтры гармоник. ПФГ представляет собой частотно-селективную цепь, обеспечивающую подавление или ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. Основными достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Они дешевы, не требуют регулярного обслуживания, могут выполнять одновременно подавление гармоник и коррекцию коэффициента мощности. Как правило, используют узкополосный фильтр – последовательный колебательный контур, настроенный в резонанс на частоту определенной гармоники (рис. 1а). Также существуют несколько разновидностей типовых схем ПФГ, такие как широкополосный фильтр второго и третьего порядка (рис. 1б и 1в, соответственно) и фильтр С-типа (рис. 1г). Однако они имеют существенные недостатки: расчет и компоновка существенно сложнее узкополосного фильтра, достаточно высокие потери мощности на основной частоте, при расстройке компонентов (в том числе вследствие старения) значительно возрастают потери.

Для подавления нескольких гармоник используют составные фильтры, образованные параллельным соединением нескольких узкополосных фильтров. Каждый колебательный контур настроен на частоту одной из гармоник (как правило, 5-й, 7-й, 11-й, 13-й).

Но у всех ПФГ имеется серьезный недостаток – они не предполагают динамичность системы энергоснабжения. При изменении нагрузки и/или питающего напряжения возможны серьезные нарушения в нормальной работе всей системы. При изменении спектрального состава вследствие увеличения или уменьшения потребления электроэнергии ПФГ могут привести к резонансным явлениям на основной частоте, что приведет к серьезному возрастанию тока и снижению напряжения; ПФГ сложно коммутировать, т. к. их подключение в сеть сопровождается высокими бросками напряжения.

Поэтому для систем энергоснабжения с высокими динамическими временными показателями были представлены системы регулируемых источников реактивной мощности (РИРМ), которые помимо компенсации (или генерации) реактивной мощности на основной частоте могут выполнять функции фильтрации гармони-

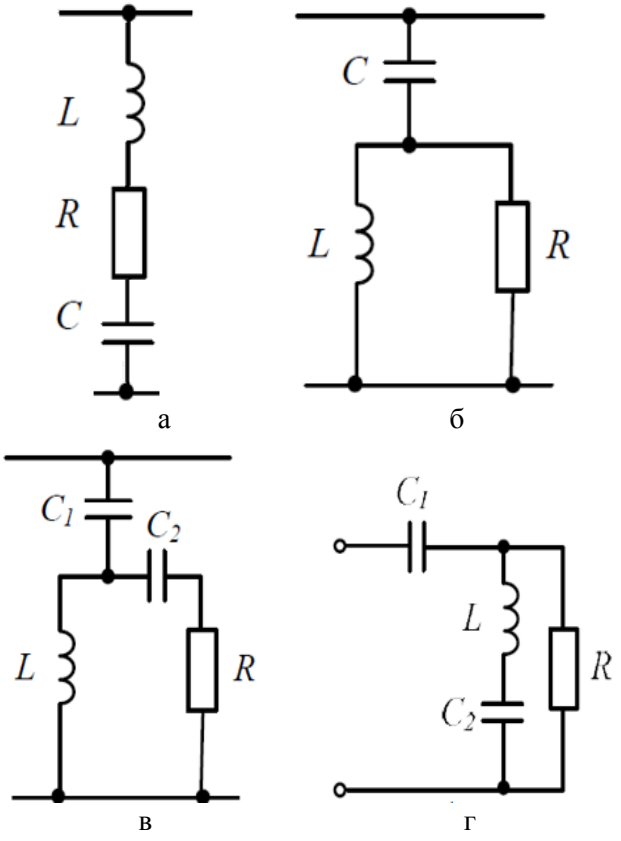


Рис. 1. Типовые схемы ПФГ:
а – узкополосный фильтр; *б* – широкополосный фильтр второго порядка;
в – широкополосный фильтр третьего порядка;
г – фильтр С-типа

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

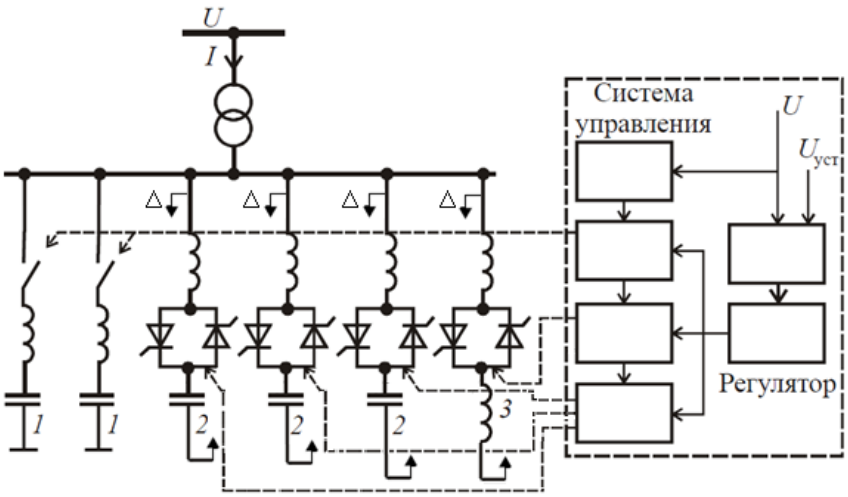


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированного СТК:
1 – коммутируемые выключателями ПФГ; *2* – коммутируемая тиристорами ФКЦ;
3 – управляемая тиристорами ТРГ

ческого спектра напряжения и тока и стабилизации напряжения для обеспечения надлежащего качества электроэнергии.

В данной работе разрабатывается алгоритм быстрого и эффективного выбора конденсаторной батареи и индуктивного реактора для пассивного фильтра гармоник и СТК на напряжении 0,4 кВ. Принципиальная схема такого РИРМ приведена на рисунке 2.

Цепи ПФГ постоянно включены, соединены по схеме «звезда», в то время как компоненты СТК соединены по схеме «треугольник», а конденсаторная батарея настраивается с индуктивным реактором в резонанс на 5-ю гармонику, что нивелирует возможное гармоническое искажение от СТК и обеспечивает дополнительную фильтрацию гармонического состава.

Разработана методика, которая позволяет для данной системы электроснабжения автоматически выбирать силовые компоненты для предложенной РИРМ при изменении уровня нелинейной нагрузки 0,4 кВ, ее типа и мощности и проверять соответствия уровня искажения напряжения THD на шинах 0,4 кВ ТП. Такая схема РИРМ может применяться как для дуговых сталеплавильных печей, так и для систем электропередач для повышения стабильности электроснабжения и повышения качества электроэнергии.

Блок-схема алгоритма расчета и выбора силовых компонентов РИРМ представлена на рисунке 3.

Модель системы электроснабжения приведена

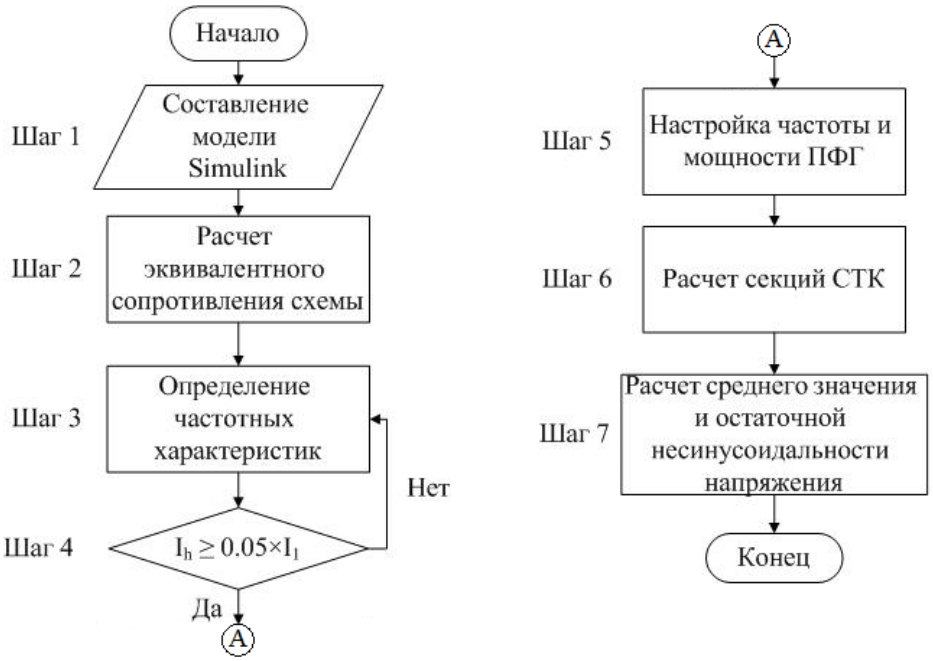


Рис. 3. Алгоритм расчета и выбора силовых компонентов СТК

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

на рисунке 4а и состоит из внешней системы питания, соединительной линии ААШв 3х95, трансформатора ТМ-2500/10, потребителя с высокой долей нелинейной нагрузки и реактивной мощности (рис. 5) и СТК.

Суть алгоритма состоит в следующем. Составляется модель Simulink и производится ввод параметров компонентов. Далее находится эквивалентное сопротивление сети и нагрузки на частоте первой гармоники (мОм):

$$Z_{ЭК} = \frac{\left(R_{пер_эк} + j \cdot X_{пер_эк}\right) \left(R_{нагр} + j \cdot X_{нагр}\right)}{\left(R_{пер_эк} + R_{нагр}\right) + j \left(X_{пер_эк} + X_{нагр}\right)},$$

где $R_{пер_эк}$ и $X_{пер_эк}$ – переходные активное и реактивное сопротивления сети; $R_{нагр}$ и $X_{нагр}$ – активное и реактивное сопротивления нагрузки.

Производится расчет необходимой минимальной реактивной мощности конденсаторных батарей ПФГ:

$$Q_{бк_n} \geq 3 \cdot 1{,}2 \cdot U_{нн} \cdot I_n,$$

где $U_{нн}$ – напряжение на низкой стороне; I_n – ток n-й гармоники.

Теперь можно вывести соотношения расчетных мощностей:

$$\begin{cases} Q_{ПФГ} = Q_{\min} + \dfrac{Q_{\max} \quad Q_{\min}}{4} \geq Q_{бк_n} \\ Q_{ТРГ} = \dfrac{1.1 \quad \left(Q_{\max} \quad Q_{ПФГ}\right)}{4} \\ Q_{ФКЦ} = \dfrac{3 \quad \left(Q_{\max} \quad Q_{ПФГ}\right)}{4} \end{cases}.$$

Такое распределение мощности между ПФГ и СТК значительно снижает общую стоимость всей установки (за счет уменьшения мощности силовой электроники в схеме СТК) без потери функциональности.

Далее, с учетом дефицита реактивной мощности, производится выбор ФКУ, его оборудования и параметров на гармонику, которую необходимо компенсировать.

Коэффициент токораспределения между ФКУ и сетью:

$$k_{пр} = \frac{1 + n_{ГАРМ} \quad tg^{\,2}}{\sqrt{\left(1 + \dfrac{R_Ф}{R_{ЭК}}\right)^2 + n_{ГАРМ} \quad tg^{\,2}}},$$

где $n_{гарм}$ – номер гармоники, которую необходимо компенсировать; $R_ф$ – активное сопротивление фильтра.

Кратность снижения напряжений n-й гармоники:

$$k_{un} = \frac{R_Ф}{R_{ЭК}} \cdot \frac{k_{пр}}{1 + n_{ГАРМ} \cdot tg\varphi^2}.$$

Остаточное напряжение n-й гармоники (%):

$$U_{n_ост} = k_{un} \cdot U_{n_гарм}.$$

THD после установки ФКУ (%):

$$k_{НС} = \sqrt{\sum U_{n_ост}{}^2}.$$

На рисунке 4б показана модель управления и силовой части СТК. За основу был взят пример из Matlab (MatLab / demos / SimPowerSystems / FACTSDemos / SVC (detaile dmodel), предложенного Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille). Настроенная на систему меньшей мощности и выполняющая другие функции модель из примера содержит три блока, имитирующих фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), и блок, имитирующий тиристорно-реакторную группу (ТРГ). Далее, на рисунках 4в и 4г, показаны блоки ФКЦ и ТРГ с полным представлением силовой электроники.

На рисунке 6 показаны остаточные после компенсации реактивная мощность (Q, МВАр) и напряжение на высокой стороне трансформатора (U, о.е.). Также можно увидеть значение угла открытия тиристорных ключей на ТРГ в градусах и количество подключаемых ФКЦ в каждый момент времени.

Таким образом, для рассмотренного примера электроснабжения подстанции промпредприятия с трансформатором мощностью 2500 кВА, с учетом дефицита реактивной мощности в 3 МВАр на пике потребления, выбрано ПФГ 5-й гармоники с параметрами $Q_{бк}$=1356 кВАр, реактор 2хРТСТ-820-0,027, $R_ф$=6 мОм, ПФГ 7-й гармоники с параметрами $Q_{бк}$=291 кВАр, реактор 2хРТСТ-660-0,064, $R_ф$=8 мОм, для СТК подо-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

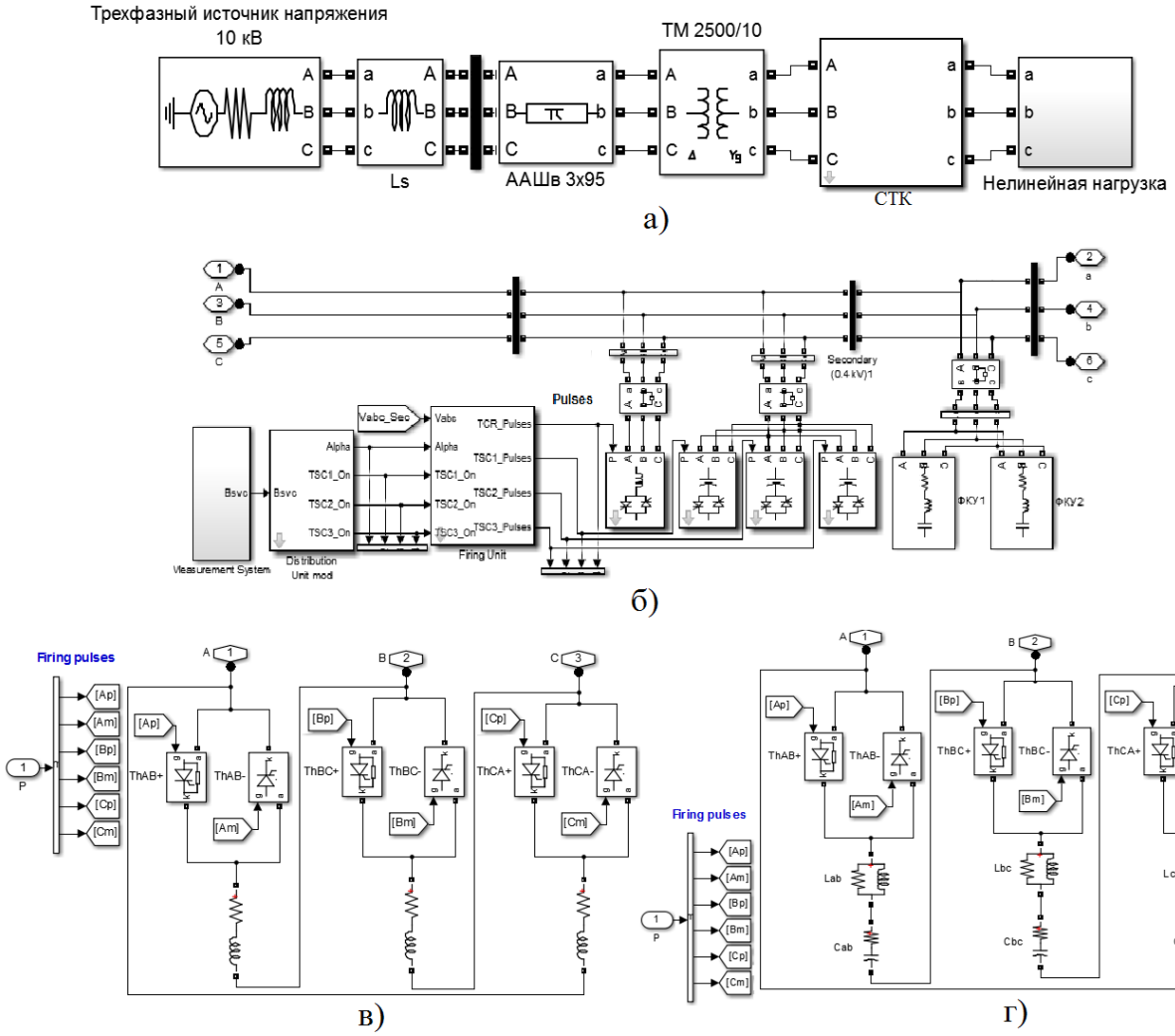


Рис. 4. Модель Simulink:
а – система электроснабжения; *б* – СТК; *в* – силовой блок ТРГ; *г* – силовой блок ФКЦ

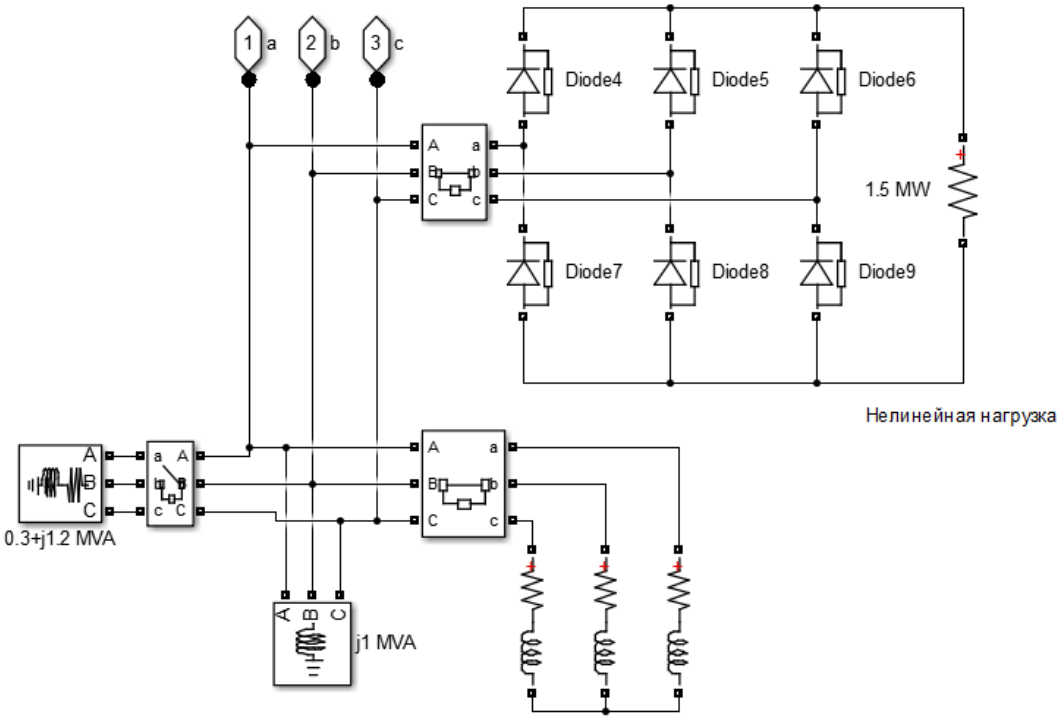


Рис. 5. Нелинейная нагрузка

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

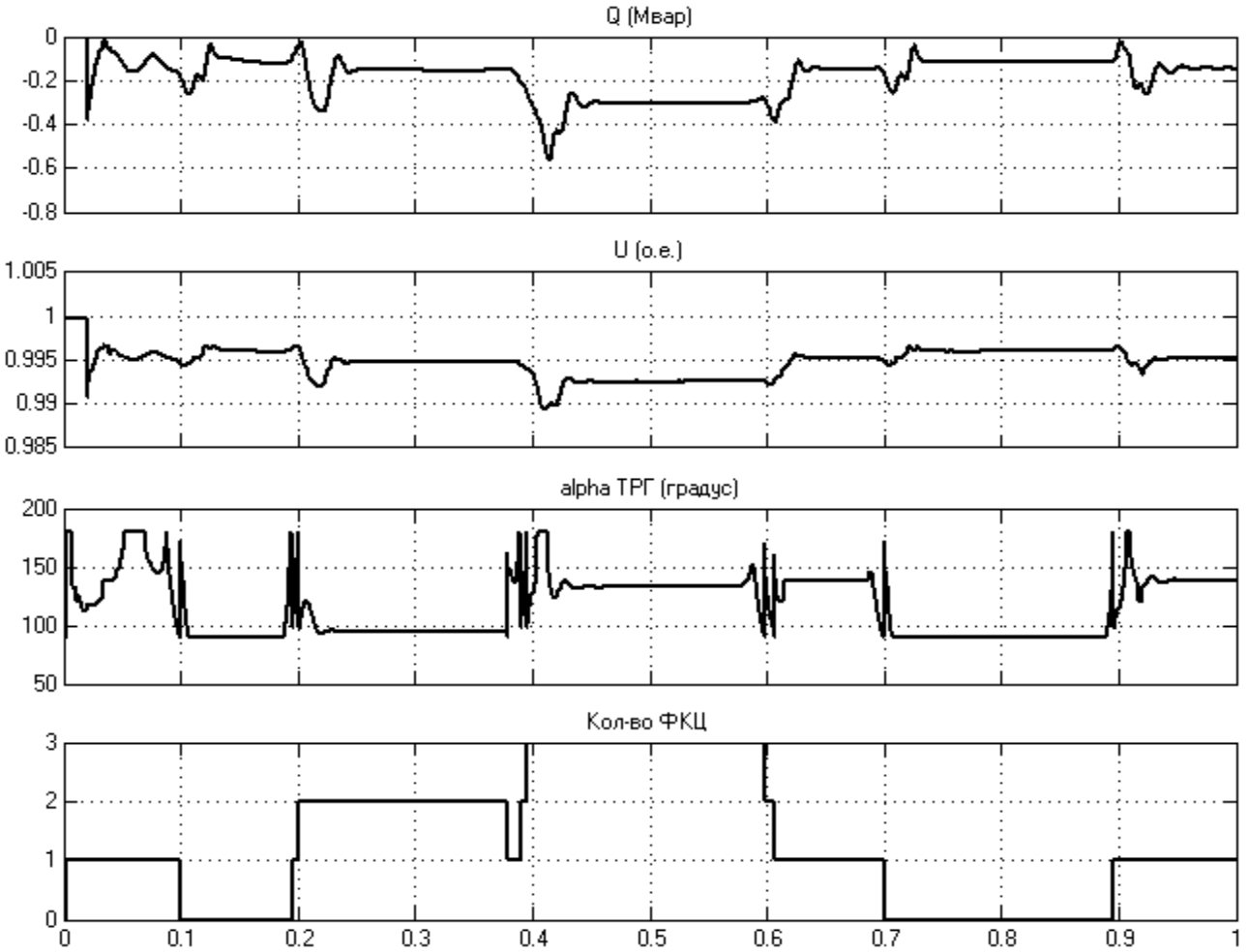


Рис. 6. Результаты моделирования во времени, с

браны три ФКЦ с параметрами $Q_{бк}$=552 кВАр и ТРГ РТСТ-410-0,076.

Выводы

В результате проведенной работы приведена схема СТК, содержащая цепи ПФГ, и разработана методика автоматизированного рационального выбора силовых компонентов на основании номиналов электрооборудования, выпускаемого отечественными производителями. Правильность выбора проверена путем моделирования в пакете прикладных программ Matlab R2014.

Список литературы

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Yao, X. The method for designing the third order filter // Proc. 8th IEEE ICHQP, 14-16 Oct. 1998, Athens. – Athens (Greece): IEEE, 1998. – P. 139-142.
3. Das, J. Passive filters – potentialities and limitations // IEEE trans. on industry applications. – 2004. – No. 1. Vol.40. – P. 232-241.
4. Koval, D. Power quality characteristics of computer loads / D. Koval, C. Carter // IEEE trans. on industry applications. – 1997. – No. 3. Vol. 33. – P. 613-621.
5. Корнилов, Г.П. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий: учеб. пособие / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 239 с.
6. Pardeep, S.V. Power System Stability Improvement of Long Transmission Line System by Using SVC / S. V. Pardeep, K. G. Vijay // International Journal of Engineering Research and Application. – 2013. – Vol. 3. Issue 5. – P. 01-03.
7. Николаев, А.А. Определение оптимального режима работы статического тиристорного компенсатора в условиях сильных отклонений напряжения / А.А. Николаев, В.В. Анохин, В.С. Ивекеев // Инновации в науке: сб. ст. по матер. LII междунар. науч.-практ. конф., 28.12.2015 г., Новосибирск. – Новосибирск: СибАК, 2015. – Ч. 1, № 12 (49). – С. 46–55.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

I.A. Bershadsky / Dr.Sci. (Eng.)/, V.V. Yakimishina /Cand. Sci. (Eng.)/, V.G. Danilov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

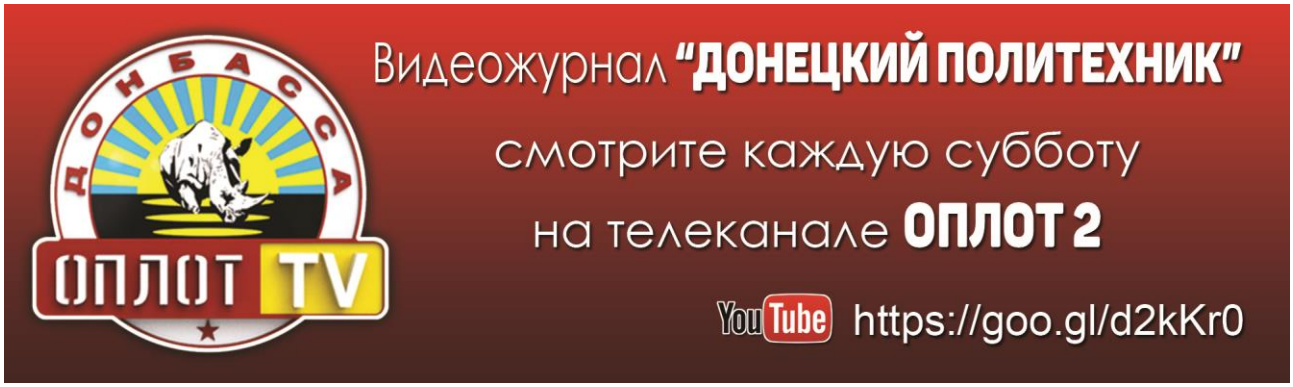
THE SELECTION OF ADJUSTABLE FILTER COMPENSATING DEVICES IN 0.4 KV NETWORKS WITH NONLINEAR LOADS

Background. *The power quality is one of the problems of the modern electricity supply. The current practice of power quality control is limited to monitoring several parameters: deviation of voltage, frequency, and harmonic composition. The main sources of deterioration of the quality of electric power supply are loads of large industrial customers with nonlinear current-voltage characteristics, which when working create the currents of non-sinusoidal shape.*
Materials and/or methods. *To optimize the algorithms for improving power quality and stability of power system with high levels of nonlinear loads using adjustable filter compensating devices (FCD) it is necessary to solve the following tasks: to analyze the power quality in distribution networks 0.4-10 kV, study compensation characteristics of different schemes and types of adjustable FCD, develop methods and algorithms for calculating the configuration with subsequent rational choice of adjustable FCD components, simulate static and dynamic characteristics of the power system.*
Results. *For the power supply of an industrial enterprise substation with transformer capacity of 2500 kVA, taking into account the deficit of reactive power in 3 MVAr at peak consumption, selected: passive harmonic filters (PHF) of the 5th harmonic with the parameters Q_{bc}=1356 kVAr, reactor 2xPTCT-820-0,027, R_f=6 mω; PHF of the 7th harmonic with the parameters Q_{bc}=291 kVAr, reactor 2xPTCT-660-0,064, R_f=8 mω. For static thyristor compensator (STC) chosen three filter compensating circuits (FCC) with the parameters Q_{bc}=552 kVAr and thyristor-reactor group (TRG) PTCT-410-0,076.*
Conclusion. *The result shows a diagram of STC containing a chain of PHF and the method for computer-aided rational selection of the power components on the basis of the values of electrical equipment produced by domestic manufacturers. The correct choice is checked by simulation in the software package Matlab R2014.*

Keywords: *power quality, distribution networks, filter compensating device.*

Сведения об авторах
И.А. Бершадский
Телефон: +380 (50) 212-20-15
Эл. почта: ibersh@rambler.ru
В.Г. Данилов
Телефон: +380 (66) 800-12-10
Эл. почта: danilov1011100@gmail.com
В.В. Якимишина
Телефон: +380 (50) 705-03-39
Эл. почта: yvsm@list.ru

Статья поступила 23.05.2017 г.
© И.А. Бершадский, В.В. Якимишина, В.Г. Данилов, 2017
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев



УДК 537.312.8

Д.В. Варюхин /к.ф.-м.н./, Н.В. Таряник, Д.О. Федюк
ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина» (Донецк)

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА В ЗАМКНУТОМ СВЕРХПРОВОДНИКОВОМ КОНТУРЕ И МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СЛАБОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описан метод и устройство его реализации для измерения затухания постоянного тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом контуре в виде небольших катушек в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида при воздействии на образец внешнего переменного магнитного поля. Разработанная методика позволяет с высокой точностью измерять затухание тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце, обусловленное возникновением сопротивления на уровне 10^{-11} Ом при воздействии переменного магнитного поля. Предложена методика измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в магнитном поле сверхпроводникового соленоида и приведена универсальная конструкция исследуемого образца с улучшенной однородностью магнитного поля намагниченности, обеспечивающая высокую точность измерений. Методы основаны на измерении магнитного поля магнитометром ядерного магнитного резонанса.

Ключевые слова: *короткозамкнутый сверхпроводниковый контур, внешнее переменное магнитное поле, магнитная восприимчивость, резонансная частота, магнитометр ядерного магнитного резонанса.*

Постановка проблемы

При разработке различных устройств, изготовленных из сверхпроводниковых материалов, таких как соленоиды, трансформаторы, которые работают на переменном токе или при воздействии на них внешних переменных магнитных полей, существует проблема возникновения и измерения затухания тока.

В сложных экспериментальных исследованиях со сверхпроводниковыми соленоидами, например, для ускорителей заряженных частиц высоких энергий, ЭПР- и ЯМР-спектроскопии предъявляются высокие требования к распределению, однородности и стабильности магнитного поля, которые могут искажаться остаточной намагниченностью конструкционных материалов. Это приводит к ошибкам экспериментов и увеличению длительности их проведения. К таким материалам относятся нержавеющие стали, сплавы на основе алюминия, латунь, медь. Поэтому к магнитным характеристикам конструкционных материалов предъявляются высокие требования.

Анализ последних исследований и публикаций

Согласно модели критического состояния [1], если неидеальный сверхпроводник 2-го рода поместить в переменное магнитное поле, то внутри сверхпроводника магнитное поле также будет изменяться. Изменение магнитного потока в толще сверхпроводника, вызванное полем протекающего в нем тока, приводит к движению вихревых нитей (скачкам магнитного потока) и, следовательно, к омическим потерям. Механизм диссипации энергии, возникающей при движении вихревых нитей в сверхпроводнике, до конца не изучен. Поскольку потери энергии имеют электромагнитное происхождение, расчет потерь сводится к вычислению магнитной энергии, которая поглощается сверхпроводником за период изменения магнитного поля.

Существует несколько методов измерения потерь в сверхпроводниках на переменном токе или в переменном магнитном поле, которые используются применительно к коротким образцам и катушкам. К ним в первую очередь относятся калориметрический и электрический методы [2,3], которые неприемлемы для измерения затухания тока в сверхпроводниковом контуре.

Для измерения магнитных характеристик материалов, таких как намагниченность и магнитная восприимчивость, используют индукционный метод [4] и магнитный метод [5] с использованием СКВИД-магнитометра. Индукционный метод измерения используют при комнатных температурах, а магнитный только при гелиевых температурах (4,2 К). В широком диапазоне температур наиболее приемлемым является метод измерения на основе ядерного магнитного резо-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

нанса (ЯМР).

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является:

1. Разработка метода и устройства его реализации для измерения затухания постоянного тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце при воздействии внешнего переменного магнитного поля.

2. Измерение магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида.

Основной материал исследования

В качестве материала по измерению затухания тока в короткозамкнутом образце используется сверхпроводник сплава НТ-50, а для измерения магнитной восприимчивости конструкционных материалов – нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т.

1. Измерение затухания тока в замкнутом сверхпроводниковом контуре

В сверхпроводнике в виде короткого образца или катушки, находящемся в переменном магнитном поле, возникают потери энергии различного происхождения: потери на вихревые токи в металлической матрице, потери на гистерезис в сверхпроводниковых нитях и потери за счет изменения собственного магнитного поля от протекающего в нем тока.

Метод измерения затухания тока в образце основан на измерении уменьшения магнитного поля тока с помощью магнитометра ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Схема установки приведена на рис. 1.

В гелиевом криостате *1* расположен источник внешнего магнитного поля в виде сверхпроводниковой магнитной системы, состоящей из внешнего *2* и внутреннего *3* соленоидов, установленных соосно, один внутри другого. Внешний соленоид *2* используется для создания постоянного магнитного поля высокой однородности в центральной зоне. Обмотка соленоида изготовлена из одножильного сверхпроводникового провода диаметром 0,38 мм сплава НТ-50 и имеет размеры: внутренний диаметр 45 мм, внешний диаметр 95 мм и длину 198 мм. Для повышения однородности магнитного поля до 10^{-4}-10^{-5} на длине 10 мм вдоль оси в обмотке выполнен наружный корректирующий паз [6]. При токе 46 А соленоид создает постоянное магнитное поле с индукцией 6,0 Т. К началу и концу обмотки соленоида подключен сверхпроводниковый ключ, который обеспечивает короткозамкнутый режим с высокой стабильностью поля во времени.

Внутренний соленоид *3* служит для создания переменного магнитного поля и выполнен в виде двух одинаковых встречно включенных однослойных обмоток диаметром 36 мм, длиной 25 мм и зазором между ними 5 мм. Обмотки соленоида изготовлены из сверхпроводникового провода диаметром 0,5 мм и содержат 90 витков. При токе 10 А соленоид создает переменное поле амплитудой до 150 эрстед, частотой до 10 Гц.

Короткозамкнутый ключом исследуемый сверхпроводниковый образец *4*, выполненный в виде колец Гельмгольца, установлен в отверстии внутреннего соленоида *3*. Внутри образца *4* соосно и симметрично относительно его центра установлен датчик магнитного поля *5* – датчик магнитометра ядерного магнитного резонанса [7]. Выполнение образца *4* в виде колец Гельмгольца обеспечивает в области расположения датчика *5* магнитное поле повышенной однородности от протекающего в нем тока. Каждая однослойная обмотка колец Гельмгольца содер-

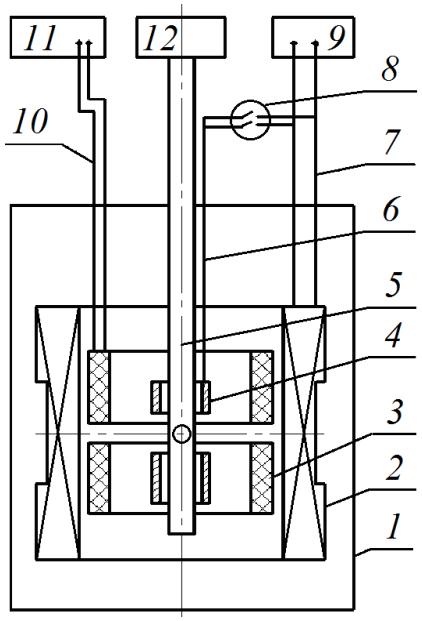


Рис. 1. Схема установки для измерения затухания тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом контуре: *1* – криостат; *2* – внешний соленоид для создания постоянного магнитного поля; *3* – внутренний соленоид для создания переменного поля; *4* – короткозамкнутый образец; *5* – датчик ЯМР-магнитометра; *6* – токовводы для запитки образца; *7* – токовводы для запитки внешнего соленоида; *8* – переключатель; *9* – источник питания внешнего соленоида и образца; *10* – токовводы для запитки внутреннего соленоида; *11* – источник питания внутреннего соленоида; *12* – регистрирующий прибор

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

жит по 12 витков провода диаметром 0,75 мм, имеет диаметр 30 мм и длину 11 мм. Зазор между обмотками – 14 мм. Расчетное значение индуктивности образца $2{,}5\cdot10^{-5}$ Гн.

Внешний соленоид *2* с помощью токовводов *7* и исследуемый образец *4* с помощью токоподводов *6* через переключатель *8* подключены к источнику постоянного тока *9*. Внутренний соленоид *3* подключен к источнику переменного тока *11* посредством токовводов *10*. Датчик *5* магнитометра соединен с генератором высокой частоты (на рис. 1 не показан) и регистрирующим прибором *12*.

Устройство работает следующим образом. После охлаждения устройства до температуры 4,2 К и заливки в криостат *1* жидкого гелия от источника постоянного тока *9* по токовводам *7* вводят ток во внешний соленоид *2* и с помощью сверхпроводникового ключа (на рисунке не показан) переводят его в режим «замороженного» магнитного потока с высокой стабильностью магнитного поля. Магнитное поле соленоида *3* контролируют и измеряют датчиком *5* магнитометра. Величина магнитного поля B_0 и резонансная частота f_0 сигнала ЯМР связаны соотношением:

$$f_0=\gamma\cdot B_0, \qquad (1)$$

где γ – гиромагнитная константа для данного спинсодержащего вещества, на котором наблюдают сигнал ЯМР. Точность измерения резонансной частоты f_0 зависит от амплитуды и ширины сигнала ЯМР. Чем выше однородность магнитного поля, тем больше амплитуда и меньше ширина сигнала ЯМР и, соответственно, выше точность измерения резонансной частоты. С целью повышения однородности поля внешний соленоид выполнен с наружным корректирующим пазом в обмотке.

Затем от этого же источника тока *9* по токовводам *6* через переключатель *8* вводят постоянный ток в исследуемый короткозамкнутый сверхпроводниковый образец *4*, предварительно разомкнув сверхпроводниковый ключ (на рисунке не показан), который после набора заданного тока «замораживают», а источник тока отключают. Образец *4* в результате протекания в нем тока создает дополнительное постоянное магнитное поле, после чего резонансная частота сигнала ЯМР изменится и станет, например, f_1. Чтобы однородность результирующего постоянного магнитного поля оставалась высокой и не ухудшалась при вводе тока в образец, последний выполнен в виде колец Гельмгольца, магнитное поле которых однородно в пространстве в окрестности центра.

Кроме того, с целью повышения стабильности постоянного магнитного поля и, соответственно, повышения точности измерений соединительные контакты в обмотках внешнего соленоида и сверхпроводникового образца выполнены холодной сваркой сверхпроводников с остаточным сопротивлением не более 10^{-11}-10^{-12} Ом [8], что обеспечивает стабильность магнитного поля на уроне 10^{-6}-10^{-8} в час.

Затем с помощью токовводов *10* от источника тока *11* вводят переменный ток во внутренний соленоид *3* и возбуждают переменное магнитное поле заданной частоты и амплитуды в области расположения исследуемого сверхпроводникового образца *4*. Выполнение соленоида *3* в виде двух одинаковых встречно включенных обмоток обеспечивает слабую, близкую к нулю, индуктивную связь с соленоидом *2* и исследуемым образцом *4*. Амплитуда переменного магнитного поля не превышала 100 эрстед, а изменение постоянного магнитного поля соленоида *2* за счет индуктивной связи с соленоидом *3* – менее 1 эрстеда. Кроме того, переменное магнитное поле возбуждают таким образом, чтобы его амплитуда со временем плавно уменьшалась от заданного значения до нуля. Такой характер переменного магнитного поля выбирают исходя из того, что индуктивная связь соленоидов *2* и *3* вследствие неточности изготовления отлична от нуля, и поэтому короткозамкнутый соленоид *2* «реагирует» на переменное поле, в результате чего стабильность его поля может ухудшиться, а точность измерений снизится. Если же амплитуда переменного магнитного поля во времени затухает, стабильность поля соленоида *2* не ухудшается.

Как отмечалось выше, в исследуемом сверхпроводниковом образце, находящемся в переменном магнитном поле, возникают потери энергии на вихревые токи в металлической матрице и потери на гистерезис в сверхпроводниковых волокнах, которые приводят к появлению сопротивления в сверхпроводнике.

По истечении определенного промежутка времени переменное магнитное поле выключают и измеряют новое значение резонансной частоты f_2 сигнала ЯМР. Изменение резонансной частоты от f_1 до f_2 позволяет определить величину затухания тока в образце как:

$$\frac{I_2-I_1}{I_1}=\frac{f_2-f_1}{f_1-f_0}, \qquad (2)$$

где I_1 и I_2 – начальное и конечное значения тока.

Затухание тока за время t в короткозамкну-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

той цепи индуктивностью L и сопротивлением R описывается выражением:

$$I_2 = I_1 \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right). \quad (3)$$

При $R(t/L)$ <1 выражение (3) приобретает вид:

$$I_2 = I_1\left(1-\frac{Rt}{L}\right). \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим, что сопротивление короткозамкнутой цепи определяется из выражения:

$$R = \frac{L}{t}\left|\frac{(f_2 - f_1)}{(f_1 - f_0)}\right| = \frac{L}{t}\left|\frac{(I_2 - I_1)}{I_1}\right|. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования по измерению затухания тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце при воздействии на него переменного магнитного поля выполнялись в постоянном магнитном поле сверхпроводникового соленоида с индукцией 5 Т. В качестве спинсодержащего вещества датчика магнитометра ЯМР использовался мелко-дисперсный Al_{27}, растворенный в эпоксидной смоле, гиромагнитная константа которого γ =11,111975 МГц/Т. Для повышения точности измерений резонансной частоты к магнитометру ЯМР подключен синтезатор частоты Ч6-31, который обеспечивал погрешность измерений не более 20 Гц.

Резонансная частота сигнала ЯМР на ядрах Al_{27} в постоянном магнитном поле 5 Т составила f_0=55,5598 МГц. После ввода тока в исследуемый сверхпроводниковый образец величиной I_1=100 А резонансная частота сигнала ЯМР изменилась и составила f_1=56,671 МГц, а после воздействия на образец переменного магнитного поля амплитудой 50 эрстед и частотой 5 Гц в течение 15 минут резонансная частота уменьшилась до f_2=56,668 МГц. Для исследуемого образца индуктивностью $2{,}5\cdot10^{-5}$ Гн, используя выражение (5), вычислено его сопротивление, которое составило $4{,}5\cdot10^{-11}$ Ом. Степень затухания тока при этом равнялась 0,14 А.

Таким образом, разработанная методика позволяет с высокой точностью измерять затухание тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце, обусловленное появлением в нем сопротивления при воздействии таких факторов как внешнее переменное магнитное поле.

2. Измерение магнитной восприимчивости слабомагнитных материалов

Метод измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида основан на измерении магнитного поля намагниченности исследуемого образца магнитометром ЯМР. Для повышения точности измерений предложена универсальная конструкция исследуемого образца, который создает собственное однородное магнитное поле намагниченности.

Схема установки для измерения магнитной восприимчивости приведена на рис. 2.

Установка содержит гелиевый криостат *1*, в котором установлен сверхпроводниковый соленоид *2*, создающий сильное магнитное поле с высокой однородностью и стабильностью, магнитометр ЯМР, включающий датчик *3*, генератор высокой частоты (на рис. 1 не показан) и регистрирующий прибор *4*. Исследуемый образец *5* выполнен в виде полого цилиндра из слабомагнитного материала и закреплен на штанге *6*, позволяющей перемещать образец вдоль и снаружи датчика *3*. Датчик *3* и штанга *6* герметично установлены в горловине криостата *1* с помощью уплотнения *7*.

После заливки в криостат *1* жидкого гелия от внешнего источника питания (на рис. 2 не показан) в обмотку соленоида *2* вводят ток и возбуждают магнитное поле с высокой однородностью и стабильностью. Исследуемый образец *5* располагают в верхней части за пределами соленоида, а датчик *3* магнитометра устанавливают в отверстии соленоида так, чтобы ампула со спинсодержащим веществом Al_{27} располагалась в центральной однородной зоне магнитного поля соленоида, и измеряют резонансную частоту f_1 сигнала ЯМР. Затем с помощью штанги *6* опускают образец *5* вниз и устанавливают его в центре соленоида и симметрично датчику *3*.

В однородном магнитном поле соленоида образец намагничивается и создает дополнительное магнитное поле ΔH, в результате чего резонансная частота сигнала ЯМР снова изменится и станет равной f_2, соответствующей полю (H-ΔH). Изменение магнитного поля на ΔH вызывает изменение резонансной частоты:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \gamma \Delta H. \quad (6)$$

С другой стороны, изменение магнитного поля за счет намагниченности образца равно:

$$\Delta H = \chi H F_0, \quad (7)$$

где χ – магнитная восприимчивость; H – магнит-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

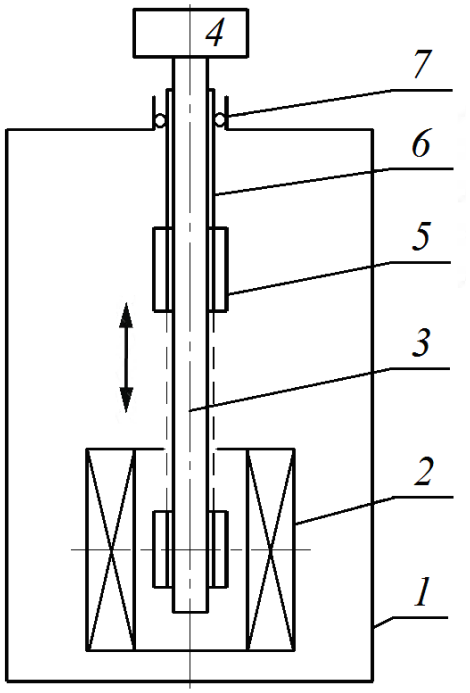


Рис. 2. Схема установки для измерения магнитной восприимчивости:
1 – криостат; *2* – сверхпроводниковый соленоид; *3* – датчик ЯМР-магнитометра; *4* – регистрирующий прибор; *5* – образец; *6* – штанга образца; *7* – уплотнение

ное поле соленоида; F_0 – фактор формы образца.

Из уравнений (6) и (7) определяют магнитную восприимчивость:

$$\chi = \frac{\Delta H}{H F_0} = \frac{1}{F_0}\left(\frac{f_2 - f_1}{f_1}\right). \qquad (8)$$

Распределение магнитного поля намагниченности внутри исследуемого образца, выполненного в виде полого цилиндра, описывается выражением:

$$\mathrm{H_z}(\mathrm{r},\theta) = \mathrm{M_z}\left[\begin{array}{c} \mathrm{F_0}(\alpha,\beta) + \\ +\mathrm{F_2}(\alpha,\beta)\mathrm{P_2}(\cos\theta)\left(\frac{\mathrm{r}}{\alpha}\right)^2 + \\ +\mathrm{F_4}(\alpha,\beta)\mathrm{P_4}(\cos\theta)\left(\frac{\mathrm{r}}{\alpha}\right)^4 \ldots \end{array}\right], \quad (9)$$

где M_z – намагниченность материала образца; $\alpha = D/d$ – приведенный наружный диаметр; $\beta = l/d$ – приведенная длина; l –длина; d – внутренний диаметр; D – наружный диаметр; $P_{2n}(\cos\theta)$ – полиномы Лежандра, описывающие зависимость членов разложения ряда от полярного угла θ;

$$F_0(\alpha,\beta) = \beta\left[\frac{1}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}\right],$$

$$F_2(\alpha,\beta) = \frac{3\beta}{2}\left[\frac{1}{\left(1+\beta^2\right)^{5/2}} - \frac{1}{\left(\alpha^2+\beta^2\right)^{5/2}}\right],$$

$$F_4(\alpha,\beta) = \frac{5\beta}{8}\left[\frac{4\beta^2-3}{\left(1+\beta^2\right)^{9/2}} - \frac{\alpha^2\left(4\beta^2-3\alpha^2\right)}{\left(\alpha^2+\beta^2\right)^{9/2}}\right].$$

Однородность поля намагниченности образца определяется членами ряда $F_2(\alpha,\beta)$, $F_4(\alpha,\beta)$, $F_6(\alpha,\beta)$ и т.д., при этом:

$$F_2(\alpha,\beta) > F_4(\alpha,\beta) > F_6(\alpha,\beta).$$

Если образец, выполненный в виде полого цилиндра, имеет приведенные к внутреннему диаметру наружный диаметр α и длину β, удовлетворяющие условию:

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha^2 - \alpha^{4/5}}{\alpha^{4/5} - 1}},$$

то он создает однородное поле намагниченности в силу того, что наибольший по абсолютной величине член разложения $F_2(\alpha,\beta)$ в уравнении (9) равен нулю. Улучшение однородности магнитного поля ведет к повышению точности измерения резонансной частоты сигнала ЯМР и, следовательно, к повышению точности измерения магнитной восприимчивости, особенно материалов со слабой магнитной восприимчивостью.

В исследованиях по измерению магнитной восприимчивости использовались два образца разных размеров из конструкционной немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Первый образец имел размеры: диаметр внутреннего отверстия 15 мм, наружный диаметр 24 мм, длину 23,4 мм и изготовлен из круглой стальной заготовки. Второй образец диаметром отверстия 20 мм, наружным диаметром 24 мм и длиной 26,7 мм вырезан из нержавеющей трубы вышеприведенных диаметров. Фактор формы $F_0(\alpha, \beta)$ первого образца равен 0,145, второго образца – 0,0566. Магнитное поле с индукцией до 7 Т, однородностью $2\cdot10^{-5}$ отн. ед. в объеме 0,5 см^3 и стабильностью $1\cdot10^{-6}$ в час создавалось сверхпроводниковым соленоидом.

Измерения магнитной восприимчивости проводились при температуре 4,2 К в магнитном поле с индукцией 5 Т. В отсутствии исследуемо-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

го образца резонансная частота сигнала ЯМР на ядрах Al_{27} в магнитном поле 5 Т составила 55560 кГц. После установки образца снаружи и симметрично датчика ЯМР резонансная частота сигнала изменилась на 3,35 кГц. Магнитная восприимчивость первого образца, вычисленная по формуле (7), составила $4{,}15\cdot10^{-4}$, восприимчивость второго образца – $4{,}1\cdot10^{-4}$, что с приемлемой точностью совпадает с результатами работы [4].

В заключение отметим, что предложенный метод может быть также успешно использован и для измерения магнитной восприимчивости материалов на уровне 10^{-5}-10^{-6}, для чего однородность магнитного поля соленоида должна быть еще выше и составлять 10^{-6}-10^{-7}отн. ед., которая достигается путем использования сверхпроводниковых обмоток коррекции однородности поля [9].

Выводы

1. Предложенный метод измерения затухания постоянного тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида при воздействии на образец переменного магнитного поля позволяет с высокой степенью точности измерять затухание тока в образце, которое обусловлено возникновением сопротивления в последнем. Так, после воздействия на образец с током 100 А переменного магнитного поля амплитудой 50 эрстед и частотой 5 Гц в течение 15 минут степень затухания тока в образце составила 0,14 А, а его сопротивление составило $4{,}5\cdot10^{-11}$ Ом.

2. В исследованиях по измерению магнитной восприимчивости использовались образцы из конструкционной немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Для повышения точности измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в магнитном поле сверхпроводникового соленоида предложена универсальная конструкция исследуемого образца, который создает однородное магнитное поле намагниченности. Магнитная восприимчивость образцов составила $(4{,}1\text{-}4{,}15)\cdot10^{-4}$, что с приемлемой точностью совпадает с результатами работы [5].

3. Высокая степень точности измерения затухания тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце и магнитной восприимчивости слабомагнитных материалов основана на использовании высокоточного метода ЯМР для измерения магнитного поля.

Список литературы

1. Bean, C.P. Magnetization of High-Field Superconductors / C.P. Bean // Reviews of Modern Physics. – 1964. – Vol. 36. No.1. – P. 31-39.
2. Hlasnik G., Lefransois J.P., Pouillange J.P., SEDAP 69-308,SUP 84, 1969; SEDAP 18/11, 1969.
3. Fietz, W.A. Electronic Integration Technique for Measuring Magnetization of Hysteretic Superconducting Materials / W.A. Fietz // Rev. Sci. Instr. – 1965. – No.36. – P.1621.
4. Костышин, А.М. Установка для исследования магнитных свойств материалов при низких температурах / А.М. Костышин, И.И. Сыч, Г.А. Такзей // Физические основы исследований маталлов: сб. научн. тр. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 31-36.
5. Применение магнитных методов для исследования эволюции структуры в аустенитных нержавеющих сталях после длительной эксплуатации энергоблоков на АЭС / В.М. Ажажа [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. – № 4-2. – С. 241-246.
6. Монтгомери, Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов / Д. Монтгомери. – Москва: Мир, 1971. – 360 с.
7. Автодинный ЯМР-тесламетр. / А.А. Глущенко [и др.] // Измерительная техника. – 1984. – № 6. – С. 56.
8. Лаптиенко, А.Я. Исследование параметров соединительных контактов обмоточных сверхпроводников / А.Я. Лаптиенко, В.А. Похилов // Вопросы атомной науки и техники. – 1986.– Вып.2. – № 6. – С.27.
9. Сверхпроводящая магнитная система для радиоспектрометра ядерного магнитного резонанса высокого разрешения на 200 МГц / В.И. Курочкин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 2. – С.183-185.

D.V. Varyukhin /Cand. Sci. (Phys.-Math.)/, N.V. Taryanik, D.O. Fedyuk
Donetsk Institute for Physics and Engineering Named after A.A. Galkin (Donetsk)

THE CURRENT MEASUREMENT IN A SHORTED SUPERCONDUCTING CIRCUIT AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SUB-MAGNETIC MATERIALS

Background. *The analysis of the magnetic field influence on the dissipationless current in the super-*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

conductor and the measurement of magnetic susceptibility of sub-magnetic materials is a key in designing devices based on superconductors, in particular, the solenoids. The objective of this paper is to develop a method of measuring the damping of the current in a shorted superconducting sample and the magnetic susceptibility of sub-magnetic structural materials in a strong magnetic field of the superconducting solenoid by using a nuclear magnetic resonance (NMR) magnetometer.

Materials and/or methods. *Measurement of the current damping in the superconducting sample in the form of Helmholtz rings exposed to an alternating magnetic field performed in a strong magnetic field of a superconducting solenoid. A high degree of measurement accuracy is achieved by using of NMR magnetometer. The magnetic susceptibility of sub-magnetic materials determined by the same method, the material is stainless steel 12X18H10T, and the sample is made in the form of a hollow cylinder.*

Results. *The proposed method is based on nuclear magnetic resonance and provides high stability and measurement accuracy. It is experimentally determined that the proposed method allows measuring the resistance in a superconducting sample at 10-11 Ohms.*

The magnetic susceptibility of stainless steel 12X18H10T is at the level of $4 \cdot 10^{-4}$, which corresponds well with the results of other researchers.

Conclusion. *Presented the technique and the results of damping measurements of the current in a shorted superconducting circuit sample exposed to an external alternating magnetic field and the magnetic susceptibility of sub-magnetic materials in a magnetic field of the superconducting solenoid.*

Keywords: *shorted superconducting circuit, external alternating magnetic field, magnetic susceptibility, resonant frequency, nuclear magnetic resonance magnetometer.*

Сведения об авторах

Д.В. Варюхин
Телефон: +380 (50) 774-82-69
Эл. почта: fedykdim@gmail.com

Д.О. Федюк
Телефон: +380 (50) 774-82-69
Эл. почта: fedykdim@gmail.com

Н.В. Таряник
Телефон: +380 (95) 219-00-96
Эл. почта: fedykdim@gmail.com

Статья поступила 17.10.2017 г.
© Д.В. Варюхин, Н.В.Таряник, Д.О. Федюк, 2017
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский



УДК 662.9

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнитиёв /к.т.н./, Т.Г. Олешкевич
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЕ

Для адаптации разработанной ранее математической модели процесса тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования разработаны методы начальной и оперативной подстройки. Для первого метода задача решается путем введения такого значения подстроечного коэффициента в формулу для определения константы окалинообразования, чтобы расчетное значение массы окалины совпало с величиной, определенной как разность исходной массы металла и его массы после тепловой обработки и зачистки от окалины. При использовании второго метода производится сравнение двух расходов кислорода, полученного в результате математического моделирования и полученного в результате работы системы диагностики и подбора подстроечных коэффициентов, позволяющих в пределах узких выделенных промежутков времени согласовать среднеинтегральные расходы кислорода, идущего на окисление.

Ключевые слова: *тепловая обработка, образование окалины, математическое моделирование, адаптация математической модели.*

Постановка проблемы

При высокотемпературном нагреве металла в пламенных нагревательных печах происходит образование окалины, что приводит к прямым потерям металла и к изменению условий теплопередачи в камере печи (с одной стороны, металл покрывается слоем материала со значительно меньшим коэффициентом теплопроводности; с другой стороны, происходит выделение теплоты по реакциям окисления железа).

Анализ последних исследований и публикаций

Достаточно эффективным инструментом для исследования тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования являются соответствующие математические модели [1-4]. Созданная в работе [2] математическая модель базируется на ряде упрощений (весь слой окалины представляется состоящим только из вюстита; темп нарастания окалины упрощенно описывается при помощи дифференциального уравнения первого порядка, для которого необходимо задание константы окалинообразования; термическое сопротивление слоя окалины учтено как внешнее термическое сопротивление). Использование названных упрощений позволило создать быстродействующую математическую модель со скоростью расчетов, превышающей темп реального времени.

Тестирование созданной модели для решения задач с учетом и без учета влияния слоя окалины, а также с учетом и без учета тепловыделения по реакции окисления железа позволило получить результаты, хорошо согласующиеся с логикой процесса и практическими данными. Уточнение информации о необходимом времени протекания процесса и температурном поле металла при учете влияния окалинообразования составляет порядка 5 % [2].

Таким образом, если рассматривается только лишь задача определения теплового состояния металла, то в большинстве случаев справедливо производить решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для металла без учета окалинообразования. Основной интерес представляет не учет влияния слоя окалины на тепловое состояние металла, а прогнозирование потерь металла с окалиной для исследуемых сочетаний конструктивных и технологических параметров. Очевидно, что точность расчетных данных, получаемых при помощи математической модели, напрямую зависит от того, насколько точно используемые константы окалинообразования описывают исследуемый процесс. Как известно, текущие значения констант окалинообразования зависят от температуры поверхности металла, парциального давления кислорода в продуктах сгорания, химического состава рассматриваемой марки стали.

При создании математической модели в работе [2] зависимость константы окалинообразования от температуры описана при помощи выражения, используемого в большинстве извест-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ных разработок [5]. Очевидно, что это уравнение, полученное на основании обработки экспериментальных данных в 70-е годы XX века, в полной мере справедливо только для определенных марок стали и типового узкого диапазона парциальных давлений кислорода в продуктах сгорания, характерного для технологий того времени.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка способов адаптации математической модели тепловой обработки металла в пламенных печах, учитывающей протекание процессов окалинообразования, к реальным условиям протекания процесса.

Основной материал исследования

Детально все этапы построения модели, адаптация которой рассматривается в данной работе, приведены в работе [2], при этом ряд подходов к заданию условий однозначности выполнен с использованием опыта работы [6]. Ниже приведены только основные моменты, связанные с математической формулировкой и заданием условий однозначности.

В основе математической постановки задачи лежит дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, которое для заготовок в цилиндрической системе координат в одномерной постановке записывается как:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_м}{\rho_м c_м} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right); \qquad (1)$$

и для футеровки в декартовой системе координат в одномерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_ф}{\rho_ф c_ф} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \qquad (2)$$

где индексы *м* и *ф* обозначают, что теплофизические характеристики взяты для металла и футеровки соответственно.

Геометрические условия для заготовки представлены произвольным радиусом заготовки в характерном поперечном сечении, а для футеровки – отрезком, нормальным к характерной плоскости, начало и конец которого лежат на наружной и внутренней поверхностях футеровки. В качестве начальных условий задается равномерное температурное распределение в «нулевой» момент времени и температура, равная температуре окружающей среды (для холодного посада). Для задания граничных условий теплообмена используются граничные условия третьего рода на поверхности расчетных сечений. В общем случае в каждый новый момент времени производится пересмотр граничных условий.

Для круглого поперечного сечения и решения задачи в одномерной постановке заданы следующие граничные условия:

$$\begin{cases} r = r_з : -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial r} = k \cdot (t_{печь} - t_{п.м}); \\ r = 0 : \dfrac{\partial t}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Для футеровки:

$$\begin{cases} y = 0 : t_{вф} = t_{кл}; \\ y = S : -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{ос} (t_{нф} - t_{ос}), \end{cases}$$

где k – коэффициент теплопередачи от печи к поверхности металла через слой окалины, Вт/(м^2·К); $\alpha_{ос}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности футеровки в окружающую среду соответственно, Вт/(м^2·К); $t_{печь}$, $t_{пм}$, $t_{вф}$, $t_{нф}$, $t_{кл}$, $t_{ос}$ – температуры печи, поверхности металла, внутренней и наружной поверхностей волокнистой футеровки, кладки и окружающей среды соответственно, °С; λ – коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м·К).

Условная температура кладки рассчитывается как:

$$t_{кл} = 100 \cdot \sqrt{\frac{q}{C_{печь-м}} + \left(\frac{t_{пок} + 273}{100} \right)^4} - 273,$$

где q – текущее значение плотности теплового потока, подводимого от печи к поверхности окалины и формируемого в основном по законам лучистого теплообмена, Вт/м^2; $t_{пок}$ – температура поверхности окалины, °С.

Коэффициент теплопередачи согласно принятой концепции исследований определяется как:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\Sigma} + \frac{S_{ок}}{\lambda_{ок}}},$$

где α_Σ – итоговый коэффициент теплоотдачи от печи к поверхности окалины, Вт/(м^2·К); $S_{ок}$ – текущее значение толщины слоя окалины, м; $\lambda_{ок}$ – коэффициент теплопроводности слоя окалины, Вт/(м·К).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

При решении задачи внешнего теплообмена необходимо учесть тепловыделение по реакциям окисления металла, а также то, что часть теплоты, подводимой к поверхности окалины, затрачивается на повышение температуры окисленного слоя.

Тогда выражение для определения итогового коэффициента теплоотдачи к поверхности окалины записывается как:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{q - q_{н} + q_{ок}}{t_{печь} - t_{пок}},$$

где $q_{н}$ – плотность теплового потока, затрачиваемого в каждый момент времени на повышение температуры слоя окалины, Вт/м^2; $q_{ок}$ – текущее значение плотности теплового потока, выделяющегося в результате окисления металла, Вт/м^2.

Плотность теплового потока, подводимого от печи к поверхности окалины, определяется как:

$$q = C_{печь\text{-}м} \cdot \left(\left(\frac{t_{печь} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{пок} + 273}{100} \right)^4 \right) + \alpha_{к} \cdot (t_{печь} - t_{пок}),$$

где $C_{печь\text{-}м}$ – приведенный коэффициент излучения в системе тел печь-металл, Вт/(м^2·К^4); $\alpha_{к}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности окалины, Вт/(м^2·К).

Текущая плотность теплового потока, затрачиваемого на догрев окалины, определяется как:

$$q_{н} = \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot S_{ок} \cdot c \cdot \rho,$$

где c – теплоемкость слоя окалины, Дж/(кг·К); ρ – плотность слоя окалины, кг/м^3.

Текущее значение плотности теплового потока, выделяющегося при окислении металла, определяется как:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{ок}^{\ 2}}{S_{ок}} \cdot q_{уд} \cdot \rho,$$

где $k_{ок}$ – текущее значение константы окалинообразования, м·с$^{-0,5}$; $q_{уд}$ – удельный тепловой эффект реакции окисления, отнесенный к 1 кг железа, Дж/кг.

Текущие значения константы окалинообразования определяются при помощи выражения (1).

Темп нарастания слоя окалины описывается при помощи дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dS_{ок}}{d\tau} = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{ок}^{\ 2}}{S_{ок}}.$$

В первом приближении $C_{печь\text{-}м}$ определяется на основании рекомендаций аналитических методик. Например, для печи с прямоугольной камерой можно использовать зависимость вида:

$$C_{печь\,м} = C_0 \cdot \frac{\varepsilon_{м} \cdot \varphi_{мк}}{1 - \varphi_{км} \cdot (1 - \varepsilon_{м})};$$

где C_0=5,67 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м^2·К^4); $\varepsilon_{м}$ – степень черноты поверхности металла; $\varphi_{км}$, $\varphi_{мк}$ – угловые коэффициенты для систем тел кладка-металл и металл-кладка соответственно.

Для численной реализации математической модели используются метод конечных разностей, который является самым эффективным для тел простой формы, и неявная схема аппроксимации.

Вопросы адаптации модели с точки зрения изучения теплового состояния металла и футеровки общеизвестны и детально рассмотрены в работах [7-9]. Адаптацию модели с точки зрения процессов окалинообразования предложено провести по следующей схеме:

– заготовки перед тепловой обработкой проходят процедуру взвешивания;

– после прохождения высокотемпературной тепловой обработки поверхность заготовок зачищается от окалины и заготовки повторно взвешиваются;

– на основании сравнения массы металла до и после тепловой обработки определяется величина потерь металла с окалиной;

– при помощи математической модели (например, созданной в работе [2]) моделируется процесс окалинообразования и определяется величина потерь металла;

– на основании сравнения потерь металла, полученных в результате непосредственного измерения и численных экспериментов, выносится суждение об адекватности математической модели в плане описания процессов окисления металла в конкретных условиях.

При установлении довольно строгих требований в плане допускаемой погрешности определения потерь металла с окалиной (например, менее 5 %) очень вероятно, что при первой оценке адекватности модели заданный уровень точности не будет достигнут. В этом случае

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

необходимо прибегнуть к методу подстройки. Предложено два варианта подстройки модели (по начальной и оперативной схеме).

Начальная подстройка предполагает задание константы окалинообразования в виде:

$$k_{ок} = \frac{k_n}{60 \cdot 1000} \exp\left(\frac{-10125}{T_{пм}} + 7{,}25\right), \qquad (3)$$

где k_n – подстроечный коэффициент.

Исходя из выражения (4) ожидаемым результатом по изучению влияния подстроечного коэффициента на количество окисленного металла является получение прямопропорциональной зависимости между ним и относительным количеством окалины ε_S (отношение массы окисленного металла, полученного при конкретном значении подстроечного коэффициента к массе окисленного металла, полученной при k_n=1) со свободным членом, равным нулю, и коэффициентом пропорциональности, равным единице. Однако это предположение нуждается в проверке, так как изменение толщины слоя окалины приводит к изменению термического сопротивления этого слоя и может вызвать изменение температуры поверхности металла, входящей в (4).

Для решения этого вопроса проведено исследование параметрической чувствительности модели по отношению к k_n для следующих произвольных исходных данных:

– нагреваются слитки из марки стали 40 с эквивалентным диаметром в наибольшем поперечном сечении 1 м;

– тепловая обработка состоит из двух этапов: подъема температуры печи от 900 °С до 1270 °С с постоянной скоростью в течение 3 часов, нагрева при постоянной температуре печи 1270 °С вплоть до достижения заданного значения среднемассовой температуры 1225 °С;

– значение характерного приведенного коэффициента излучения принято $C_{печь\text{-}м}$=3,552 Вт/(м^2·К^4).

– для металла заготовок заданы следующие теплофизические характеристики:

$$\lambda_м(t) = 51{,}7 - 3{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot t\text{-}8{,}576 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 5{,}979 \cdot 10^{-8} \cdot t^3,$$

$$c_м(t) = 392 + 0{,}937 \cdot t - 3{,}163 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2{,}308 \cdot 10^{-7} \cdot t^3,$$

– для футеровки коэффициент теплопроводности принят 0,1 Вт/(м·К), теплоемкость 1000 Дж/(кг·К), плотность 200 кг/м^3;

– для окалины, учитывая ее состав, на основании данных работ приняты коэффициент теплопроводности 2,1 Вт/(м·К), теплоемкость 1000 Дж/(кг·К), плотность 4000 кг/м^3. Удельное тепловыделение при окислении железа принято, как для реакции окисления до FeO, и составляет 4,7 МДж/кг.

Обработка результатов показала, что в допустимых пределах (погрешность 1-2 %) возможно использовать прямопропорциональную зависимость ε_s=k_n. Дополнительно исследован вопрос, не влияет ли процедура начальной подстройки модели по показателям окалинообразования на искажение результатов, связанных с динамикой нагрева. На рис. 1 показана зависимость относительного времени тепловой обработки металла до достижения заданного теплового состояния (отношение времени тепловой обработки при конкретном значении k_n к времени тепловой обработки при k_n=1) от значения подстроечного коэффициента.

Анализ представленных результатов показывает, что адаптация модели по показателям окалинообразования предложенным способом практически не искажает результатов определения теплового состояния металла (например, уменьшение k_n на 15 % уменьшает ε_τ не более чем на 0,7 %).

Предложенный подход позволяет в условиях металлургического или машиностроительного предприятия, выбранного в качестве полигона для исследования, определить типовые значения k_n, соответствующие тепловой обработке различных марок стали с использованием различных технологических параметров.

Для проведения этой работы целесообразно производить систематизированный сбор данных. В качестве формы для этой цели может служить таблица.

Полученные, накопленные и систематизированные таким образом результаты позволят задавать значения k_n, соответствующие конкрет-

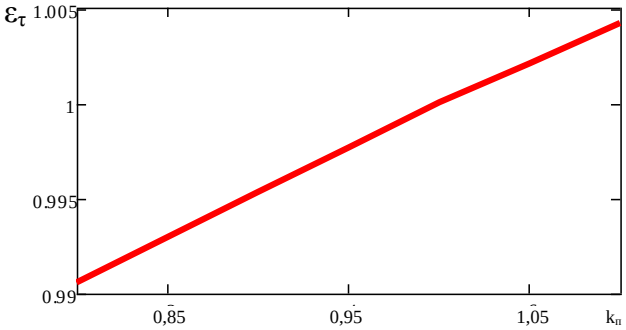


Рис. 1. Зависимость относительного времени, требуемого для тепловой обработки, от значения подстроечного коэффициента

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Форма для систематизации опытных данных, предназначенных для подстройки математической модели тепловой обработки стали, учитывающей окалинообразование

№ п/п	Среднее парциальное давление кислорода за период нагрева, в котором температура поверхности металла более 800 °С	Марка стали (среднее содержание основных компонентов)	Потери металла с окалиной, %	Продолжительность нагрева металла, ч	Параметры поперечного сечения заготовок	Значение подстроечного коэффициента к уравнению (1)
1						
2						

ным технологическим параметрам, для которых требуется произвести исследование процесса окалинообразования.

Предложенный алгоритм *оперативной подстройки* предполагает сравнение расходов кислорода на окисление металла, получаемых в процессе проведения численного эксперимента и выдаваемых системой диагностики, основанной на анализе моментальных материальных и тепловых балансов печной системы. В качестве системы диагностики рекомендуется использовать разработку авторов, предложенную в работе [10].

В результате работы системы диагностики в режиме реального времени происходит определение трех величин: текущие значения подсоса воздуха в топку и участок газохода от пламенного окна до рекуператора, $V^m_{под}$, $V^г_{под}$, и текущий расход кислорода на окисление металла, $V^{O_2}_{ок}$. В основе разработки лежит составление и решение системы из трех уравнений, представляющих собой тепловой баланс рекуператора и материальный баланс по кислороду на различных участках печной системы.

В данную систему уравнений в качестве аргументов входит следующий перечень измеряемых величин: температура воздуха до и после рекуператора ($t^{вх}_в$, $t^{вых}_в$, °С); температура продуктов сгорания до и после рекуператора ($t^{вх}_{пс}, t^{вых}_{пс}$, °С); концентрация кислорода в районе пламенного окна и перед рекуператором ($C^o_{O_2}, C^p_{O_2}$, дол. ед.).

Схема расстановки чувствительных элементов для реализации предложенного компонента диагностики процессов окисления металла на примере печи периодического действия приведена на рис. 2.

Система уравнений, решение которой на каждом временном шаге позволит определить искомые величины, записывается следующим образом:

$$\begin{cases} V_m \cdot \nu_{пс} + V^m_{под} + V^г_{под} - V^{O_2}_{ок} = \\ = \dfrac{V_в \cdot c_в\left(\dfrac{t^{вх}_в + t^{вых}_в}{2}\right)\cdot(t^{вых}_в - t^{вх}_в)}{(t^{вх}_{пс} - t^{вых}_{пс})\cdot\sum\limits_{i=1}^{n} C^{ком}_i \cdot c^{ком}_i\left(\dfrac{t^{вх}_{пс} + t^{вых}_{пс}}{2}\right)}; \quad (4) \\ C^o_{O_2} = \dfrac{V_m \cdot \nu_{пс} \cdot C^{пс}_{O_2} + V^m_{под} \cdot C^{ва}_{O_2} - V^{O_2}_{ок}}{V_m \cdot \nu_{пс} + V^m_{под} - V^{O_2}_{ок}}; \quad (5) \\ C^p_{o2} = \dfrac{V_m \cdot \nu_{пс} \cdot C^{пс}_{O_2} + V^m_{под} \cdot C^{ва}_{O_2} + V^г_{под} \cdot C^{ва}_{O_2} - V^{O_2}_{ок}}{V_m \cdot \nu_{пс} + V^m_{под} + V^г_{под} - V^{O_2}_{ок}}, \quad (6) \end{cases}$$

где $c_в$ – теплоемкость воздуха, идущего на горение, Дж/(м^3·К); $C^{ком}_i$ – объемная концентрация i-го компонента газовой среды перед рекуператором; $c^{ком}_i$ – теплоемкость i-го компонента газовой среды при средней температуре его пребывания в рекуператоре, Дж/(м^3·К); $C^{пс}_{O_2}$ – объемная концентрация кислорода в продуктах сгорания, определяемая на основании стандартных подходов теории горения топлива; $C^{ва}_{O_2}$ – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе; $\nu_{пс}$ – удельный выход продуктов сгорания, м^3/м^3.

Первое уравнение системы представляет собой выражение из теплового баланса идеализированного рекуператора, не имеющего потерь теплоты, а также перетоков воздуха и продуктов сгорания. Второе уравнение получено из рассмотрения баланса кислорода в районе пламенного окна, а третье – из баланса кислорода перед рекуператором.

Значения концентраций компонентов продуктов сгорания перед рекуператором для уравнения (1) определяются при помощи следующих выражений:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

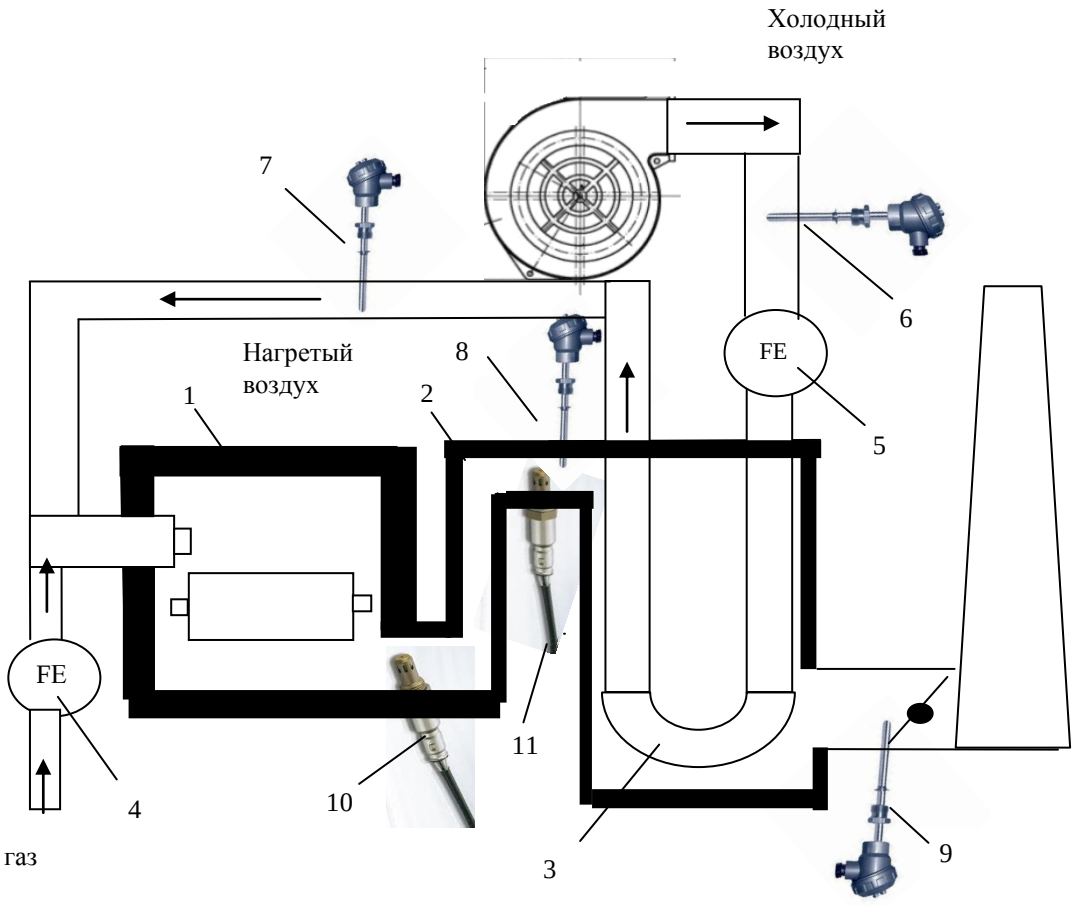


Рис. 2. Схема сбора информации от первичных датчиков для системы диагностики процессов окисления в печи периодического действия:
1 – камера печи; *2* – участок газохода от камеры печи до рекуператора; *3* – рекуператор; *4, 5* – расходомеры по топливу и воздуху соответственно; *6, 7* – термопары для измерения температуры холодного и нагретого воздуха соответственно; *8, 9* – термопары для измерения температуры продуктов сгорания до и после рекуператора соответственно; *10, 11* – датчики концентрации кислорода в районе пламенного окна и перед рекуператором соответственно

$$C_{CO2}^{ком} = V_m \cdot \nu_{nc} \cdot C_{CO_2}^{nc} / (V_m \cdot \nu_{nc} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2});$$

$$C_{H2O}^{ком} = (V_m \cdot \nu_{nc} \cdot C_{H_2O}^{nc} + 0{,}00124 \times \times (V_{под}^{m} + V_{под}^{г}) \cdot d_\nu) / (V_m \cdot \nu_{nc} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} \cdot V_{ок}^{O_2});$$

$$C_{o2}^{ком} = (V_m \cdot \nu_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^{m} \cdot C_{O_2}^{ва} + V_{под}^{г} \cdot C_{O_2}^{ва} - V_{ок}^{O_2}) / / (V_m \cdot \nu_{nc} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2});$$

$$C_{N2}^{ком} = (V_m \cdot \nu_{nc} \cdot C_{N_2}^{nc} + V_{под}^{m} \cdot C_{N2}^{ва} + V_{под}^{г} \cdot C_{N2}^{ва}) / / (V_m \cdot \nu_{nc} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2}),$$

где d_ν – абсолютное влагосодержание воздуха, г/м^3; $C_{CO_2}^{nc}, C_{H_2O}^{nc}, C_{O_2}^{nc}, C_{N_2}^{nc}$ – объемные концентрации углекислоты, водяных паров, кислорода и азота в продуктах сгорания, определяемые на основании стандартных подходов теории горения топлива.

Решение системы уравнений (4-6) необходимо производить для исследуемого момента времени на основании текущих значений величин-аргументов. Для использования созданного компонента в отрыве от АСУ на ПК, находящейся под управлением обычной ОС, данная система элементарно решается при помощи стандартных вычислительных пакетов. Для режима работы в рамках АСУ составляется программный модуль, реализующий стандартные способы решения систем уравнений. Для рассматриваемой системы более удобными оказываются стандартные численные методы решения систем уравнений.

На рисунке 3 показан пример сравнения изменения расходов кислорода, идущего на окисление металла, полученных при помощи математической модели и с использованием системы диагностики. На каждом выделенном временном промежутке производится выбор значения

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

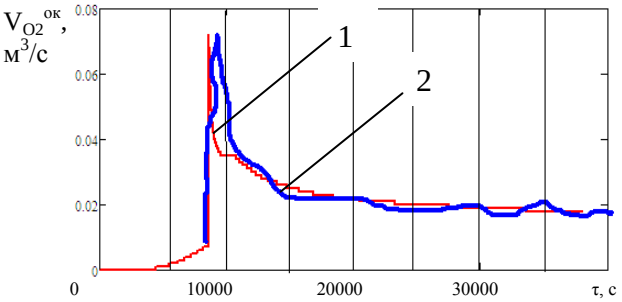


Рис. 3. Изменение во времени расхода кислорода, идущего на окисление металла:
1 – результат численных экспериментов;
2 – результат работы системы диагностики

подстроечного коэффициента (таким же образом, как в методе начальной подстройки) для достижения равных значений среднеинтегральных расходов кислорода в пределах выделенных промежутков времени. Приведенные на рисунке 3 результаты численных экспериментов получены для набора исходных данных, ранее использованного в данной статье. Кривая, соответствующая результатам работы системы диагностики, нанесена произвольно, так как на данный момент эта система диагностики, разработанная теоретически и алгоритмически, только готовится к внедрению.

Выводы

Обосновано, что для решения вопроса об адекватности математической модели процесса тепловой обработки металла в печах, учитывающей динамику процессов окисления поверхности металла, целесообразно сопоставлять массу окисленного металла, полученную в результате численных экспериментов, с изменением массы металла после тепловой обработки и зачистки от окалины по сравнению с исходной массой металла.

Для адаптации математической модели отработано применение методов начальной и оперативной подстройки. В первом случае задача решается путем введения подстроечного коэффициента в формулу для определения константы окалинообразования. Исследование параметрической чувствительности модели относительно подстроечного коэффициента показало линейную зависимость массы окисленного металла от значения данного коэффициента. При этом доказано, что адаптация математической модели по показателям окалинообразования практически не приводит к искажению результатов определения температурного состояния металла.

Для оперативной подстройки в режиме реального времени производится сравнение текущего расходования кислорода на окисление металла, прогнозируемого при помощи математической модели, с текущим расходом кислорода на окисление, полученным в результате работы системы диагностики, и подбор подстроечных коэффициентов, позволяющих в пределах узких выделенных промежутков времени согласовать среднеинтегральные расходы кислорода, идущего на окисление.

Список литературы

1. Майстер, Ф. Уменьшение образования окалины в нагревательных печах / Ф. Майстер, Х. Эртель // Черные металлы. – 2007. – № 2. – С. 44-48.
2. Математическое моделирование процессов тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования / А.Б. Бирюков [и др.] // Сталь. – 2016. – № 8. – С. 85-90.
3. The effect of heat treatment on the structure of scale layer and its removing by pickling in reducing melt / P. Váňová [et al.] // 22d Int. Metallurgical & Material Conf. METAL 2013, 15 - 17.5.2013, Brno, Czech Republic, EU. – 8 p.
4. Steel Heat Treatment. Metallurgy and Technologies. Edited by George E.Totten, Ph.D., FASM, Portland State University, 2007. – 837 p.
5. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
6. Biryukov, A.B. Mathematical Model for Studying of Metal Air Cooling Process in Furnaces /A. B. Biryukov, A.I. Voloshin, P.A. Gnitiev // Steel in Translation, 2015. – No.7. Vol. 45. – P. 534-538.
7. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование промышленных печей: учебник для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
8. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко // Серия «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». Т.13. – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
9. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов / А.Б. Бирюков [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2014. – № 2. Т.36. – С. 29-35.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

10. Диагностика процесса окисления металла в пламенных печах / А.Б. Бирюков [и др.] // Металлургические печи. – 2014. – Выпуск 6(21). – С. 3-11.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/, T.G. Oleshkevich
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ADAPTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF METAL HEAT TREATMENT IN FURNACES CONSIDERING SCALE FORMATION

Background. *High-temperature heating of metal in the flame furnaces is accompanied by scale formation. This causes metal loss and change of conditions of heat transfer in the furnace chamber. There are a number of mathematical models that allow simultaneous considering the high-temperature thermal processing of metal and scale formation. However, an important task is the adaptation of these models to the specific conditions of furnaces and steel grades subjected to heat treatment, which determined the objective of this paper.*

Materials and/or methods. *To adapt the mathematical model of heat treatment of metal considering scale formation, the methods developed for its initial and operational adjustment. The idea of initial adjustment is based on the introduction of the adjustment coefficient in the formula to determine the scale formation constants. The value of this coefficient is determined so that the calculated mass value of the scale coincides with the value defined as the difference between the initial mass of the metal and its mass after heat treatment and descaling. Operational adjustment in real time is based on comparing the current oxygen consumption for oxidation of the metal, predicted with the help of the mathematical model, with the current oxygen consumption for oxidation, resulting from the operation of the diagnostic system. With this, the adjustment coefficients were selected so that within the narrow allocated time slots average integral oxygen consumptions obtained by different methods were equal within the maximum permissible errors.*

Results. *Study of parametric sensitivity of the model relative to adjustment coefficient showed a linear dependence of the mass of oxidized metal on the value of this coefficient. It is proved that the adaptation of the mathematical model in terms of scale formation almost does not distort the results of determination of the thermal condition of the metal.*

Conclusion. *Obtained under different conditions, accumulated and systematized the results of the adaptation of the model of heat treatment of metals, considering scale formation, will in the future allow setting the values of adjustment coefficients without the procedure of adaptation.*

Keywords: *heat treatment, scale formation, mathematical modeling, adaptation of the mathematical model.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков
SPIN-код: 3186-0680
Scopus ID: 7006918782
Orcid ID: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

Т.Г. Олешкевич
SPIN-код: 4349-1090;
Orcid ID: 0000-0001-9308-065X
Телефон: +380 (62) 301-08-65
+380 (50) 630-57-65
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

П.А. Гнитиёв
SPIN-код: 1943-4196
Scopus ID: 56916104300
Orcid ID: 0000-0001-9266-7969
Телефон.: +380 (62) 301-08-65
+380 (66) 671-34-71
Эл. почта: gnitiev.pavel@gmail.com

Статья поступила 18.07.2017 г.
© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, Т.Г. Олешкевич, 2017
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров

УДК 669: 536.24

Н.И. Захаров /д.т.н./, И.В. Тупилко, Е.В. Сапронова, И.В. Зябрев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕЖИМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОЙ СТАЛИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Проблема энергосбережения решается применительно к технологии обработки стали порошковой проволокой (ПП) с силикокальциевым наполнителем. Использован метод компьютерного моделирования на основе математической модели процессов тепломассопереноса. Модель согласуется с данными экспериментальных исследований. На основании результатов компьютерного моделирования проанализированы стадии плавления ПП с силикокальциевым наполнителем. Показано, что уменьшение ее диаметра при фиксированном массовом расходе силикокальция приводит к увеличению как раскисляющего воздействия кальция на металл, так и значения оптимальной (рациональной) скорости ввода ПП в расплав, существование которой показано на основе компьютерного моделирования. Количественно исследованы зависимости времени плавления оболочки ПП от плотности теплового потока и степени усвоения наполнителя ПП от скорости ее ввода в расплав стали. Разработана полуэмпирическая формула, которая определяет энергосберегающий режим интенсификации технологии.

Ключевые слова: *порошковая проволока, расплав стали, оксидные включения, энергосбережение, тепломассоперенос*.

Постановка проблемы

Проблема энергосбережения в ДНР, вследствие высокого удельного расхода материальных и энергоресурсов при интенсификации различных технологий, является одной из самых актуальных. Разработка энергосберегающих режимов интенсификации металлургических технологий на основе методологии подобия связана с необходимостью обеспечить равенство одноименных критериев подобия лабораторной модели и реального металлургического агрегата. Для многопараметрической технологии количество критериев подобия возрастает и возможность использования этой методологии, как известно, затруднительна.

Анализ последних исследований и публикаций

Перспективным способом раскисления стали является ее обработка порошковой проволокой с силикокальциевым наполнителем, который в 1,5 раза дешевле продувки CaSi смесью в потоке аргона, при этом меньше выделяется дыма и ниже потери тепла [1]. Известно, что процесс обработки жидкой стали кальцийсодержащей порошковой проволокой для ее раскисления состоит из следующих стадий: плавление оболочки, взаимодействие наполнителя ПП с компонентами расплава, образование и рост комплексных оксидных включений, удаление их из расплава при раскислении стали продувкой аргоном различной интенсивности.

Важнейшим технологическим параметром интенсификации рассматриваемой технологии является скорость ввода ПП в жидкую ванну, рациональный выбор которой обеспечивает расплавление оболочки ПП ближе к днищу ковша. В этом случае жидкие капли легкоплавкого наполнителя ПП, всплывая в расплаве стали, максимально усваиваются им [2]. На существование рациональной скорости V_p ввода порошковой проволоки в жидкий металл со шлаком на его поверхности указывают экспериментальные исследования [3-5].

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка энергосберегающих режимов интенсификации технологии, которые обеспечивают экономное расходование дорогостоящей порошковой проволоки.

Основной материал исследования

Одним из методов разработки энергосберегающих режимов рассматриваемой технологии является компьютерное моделирование на основе детерминированных математических моделей [6,7].

С учетом специфики тепловой задачи, ее математическую постановку можно описать следующим уравнением:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho_i C_i r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(rF_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), \qquad (1)$$

краевые условия к уравнению (1) имеют вид:

– начальные условия:

$$T=T_3=T_0;\ R_1(0)=R_2(0)=R;\ R_3(0)=R+\delta, \qquad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды; R – радиус области, занимаемой наполнителем ПП в начальный момент времени; δ – толщина стальной оболочки в этот момент.

Диапазон изменения радиальной координаты r в каждой из областей:

$$i=1{:}\ 0 \le r \le R_1(\tau)=R+\Delta R_1(\tau),\quad \Delta R_1<0;$$

$$i=2{:}\ R_1(\tau) \le r \le R=R;$$

$$i=3{:}\ R \le r \le R_3(\tau)=R+\Delta R_3(\tau),\quad \Delta R_3(0)=\delta,$$

где $R_1(\tau)$ – граница твердой фазы этого наполнителя; R_2 – граница жидкой его фазы; $R_3(\tau)$ – внешняя граница стальной оболочки проволоки.

Стальная оболочка в общем случае включает как первоначальную оболочку, так и намороженную на нее твердую корочку стали.

Очевидно, что $R_3>R_2\ge R_1$. При этом: $\Delta R_3>0$ для налипания корочки и $\Delta R_3<0$ – при плавлении оболочки ПП с корочкой.

– граничные условия:

а) ось симметрии ($r=0$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0; \qquad (3)$$

б) стык наполнителя и стальной оболочки ($r=R$):

$$T_2 = T_3; \qquad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}; \qquad (5)$$

в) граница $r=R_1$:

$$T_1 = T_2, \text{ если } T_2 < T_n^{\text{л}}; \qquad (6)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} + \rho_1 \cdot L_1 \cdot \dot{R}_1,$$

$$\text{если } T_2 = T_n^{\text{л}}, \qquad (7)$$

г) граница $r=R_3$:

$$T_3 = T_c, \text{ если } T_3 < T_n^{c}; \qquad (8)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} + \rho_3 \cdot L_3 \cdot \dot{R}_3 = \alpha(T_c^{o} - T_n^{c}),$$

$$\text{если } T_3 = T_n^{c}, \qquad (9)$$

где $T_n^{\text{л}}, T_n^{c}$ – температуры ликвидуса наполнителя ПП и стали; T_c^{o}, T_c – температура стали в объеме ковша и при $r=R_3$; ρ_1, ρ_3 – плотности наполнителя и стали; L_1, L_3 – удельные теплоты фазовых переходов; $\dot{R}_1, \dot{R}_3$, – скорости перемещения границ $r=R_1$ и $r=R_3$.

Уравнение (1) с краевыми условиями решалось методом конечных разностей с явным выделением подвижных границ фазового перехода.

Стадии плавления ПП с силикокальциевым, т.е. легкоплавким, наполнителем имеют последовательность, показанную на рис. 1.

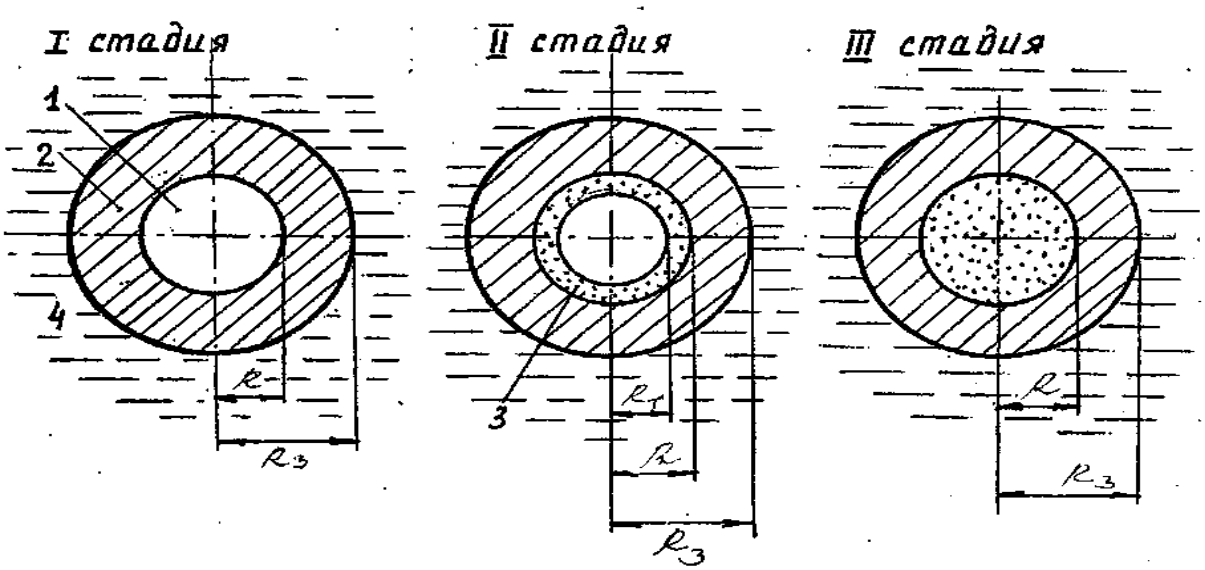


Рис. 1. Стадии плавления ПП с силикокальциевым наполнителем

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

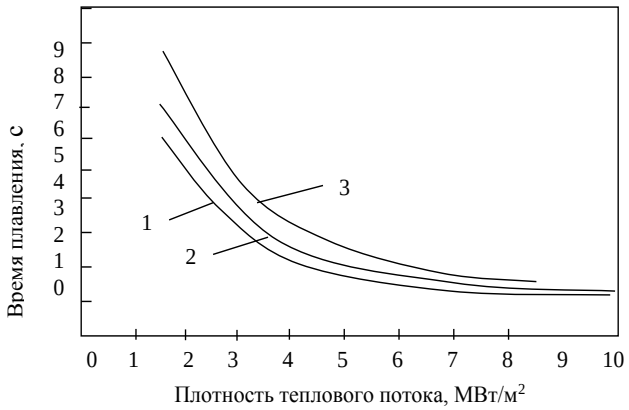


Рис. 2. Время расплавления оболочки ПП и корки стали, намерзшей на ПП, с силикокальцием в зависимости от плотности теплового потока, направленного на поверхность ПП: *1* – диаметр 8 мм; *2* – диаметр 10 мм; *3* – диаметр 13 мм

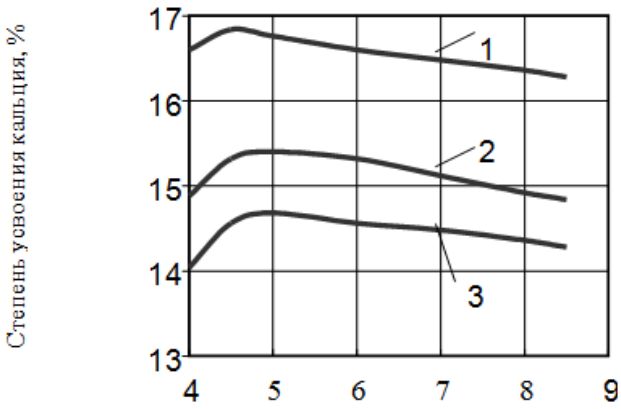


Рис. 3. Зависимость степени усвоения кальция от скорости ввода ПП и относительного содержания Са в наполнителе ПП: 1–θ=0; 2–θ=-0,1; 3–θ=-0,15

В начальные моменты времени, на стадии I, геометрия сечения ПП характеризуется двумя областями: 1 – твердый наполнитель ПП и 2 – стальная оболочка ПП с намерзшей на ней коркой стали (на рис. не показана).

Затем, на стадии II, по мере плавления наполнителя формируется третья область – расплав наполнителя ПП. И наконец, по завершению расплавления наполнителя, снова возвращаемся к двум областям, одна из которых, вместо твердой фазы наполнителя ПП, превращается в жидкое его состояние.

Численное параметрическое исследование на ПЭВМ проводилось для силикокальциевой проволоки на базе СК30 температуры расплава в сталеразливочном ковше 1590 °С, глубины жидкой ванны 6 м.

Как следует из рис. 2, зависимость времени плавления оболочки ПП с коркой стали от плотности теплового потока носит убывающий характер. Отсюда следует необходимость увеличивать скорость ввода ПП меньшего диаметра в расплав стали.

Количественная зависимость от параметров процесса степени усвоения кальция жидкой ванной, рассчитанная по методике [1], показана на рис. 3. Один из этих параметров – скорость ввода ПП в ковш. Как следует из рис. 3, при скорости ввода ПП как фактора интенсификации технологии, превышающей оптимум, происходит снижение степени усвоения кальция расплавом стали и раскисляющего воздействия кальция на металл, что согласуется с результатами экспериментальных исследований [3,4].

На рис. 4 при отмеченных выше базовых параметрах технологии показана зависимость степени усвоения кальция расплавом стали от диаметра и скорости вводимой ПП. Как следует из этого рисунка, уменьшение диаметра ПП при фиксированном массовом расходе силикокальция приводит к увеличению как раскисляющего воздействия кальция на металл, так и значения рациональной скорости ввода ПП.

На основании результатов компьютерного моделирования обобщим формулу работы [8] в виде:

$$V_p = \frac{KH}{17{,}3 - 0{,}01 \cdot T} \cdot e^{+\gamma(\delta / D)}, \qquad (10)$$

где γ – положительный коэффициент настройки этой полуэмпирической формулы на условия реальной технологии, безр.; T – температура стали, °С; H – высота расплава в ковше, м; δ, D – толщина оболочки и диаметр ПП, м; K=1, град/с.

При использовании формулы (10) (следуя концепции математических моделей смешанного типа [9]) сначала проводят статистические исследования серии плавок одной и той же марки стали с обработкой ПП одинаковой толщины ее оболочки и видом наполнителя. Определяют скорость (V_p) ввода ПП в ковш, которая соответствует максимальному усвоению наполнителя. Коэффициент γ определяют по формуле:

$$\gamma = (D/\delta) \cdot \ln\left[V_p \cdot (17{,}3 - 0{,}01 \cdot T) / KH\right].$$

В соответствии с опытно-промышленными данными [5], при использовании ПП СК30 диаметром 10 мм, толщиной оболочки δ=0,4 мм при вводе в ковш со сталью марки 09Г2 при температуре 1600 °С и глубиной наполнения ковша 6 м скорость ввода ПП, соответствующая

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

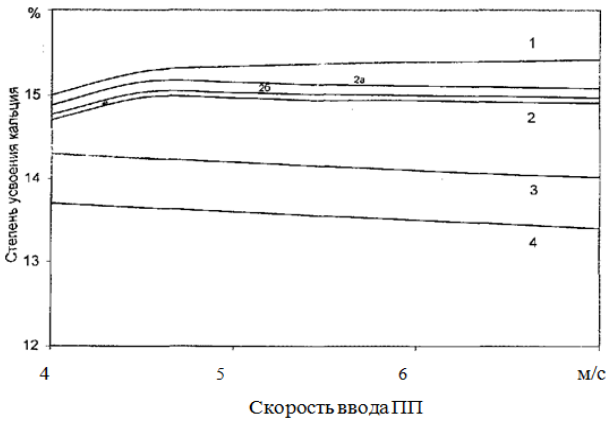


Рис. 4. Зависимость степени усвоения кальция от скорости ввода ПП и ее диаметра: 1:d=8 мм; 2:d=10 мм; 3:d=13 мм; 4:d =15 мм; *2а, 2б* – первое и второе приближения

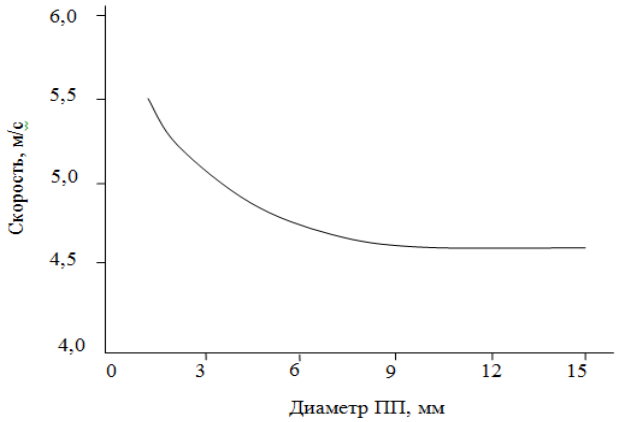


Рис. 5. Зависимость рациональной скорости ввода ПП в расплав стали от диаметра ПП: H=6,0 м; T=1590 °С; δ=0,4 мм; γ=0,454

максимальному усвоению кальция, равна 4,7 м/с. В этом случае:

$$\gamma = \frac{10}{0{,}4} \cdot \ln\left[\frac{4{,}7(17{,}3\text{-}16)}{6}\right] = 0{,}454.$$

Рис. 5 иллюстрирует зависимость рационального выбора скорости ввода ПП в расплав стали марки 09Г2 от диаметра проволоки. Как следует из этого рисунка, для диаметров ПП в диапазоне 8-15 мм рассматриваемая зависимость слабая и ею можно пренебречь. Вместе с тем, с целью интенсификации массообменных процессов и повышения производительности агрегата внепечной обработки стали путем одновременного ввода нескольких проволок меньшего диаметра [10,11] (при фиксированном массовом расходе их наполнителей одного состава) зависимость $V_p(d)$ более выражена, и ее целесообразно учитывать.

Опытно-промышленные исследования проведены в конвертерном цехе МК «Азовсталь» для ПП с наполнителем СК30. Обрабатывали расплавы стали марки 09Г2 (с повышенными требованиями по их чистоте) на установке доводки металла (УДМ). Трайб-аппарат позволял вводить ПП по направляющей, близкой к вертикальной оси сталеразливочного ковша, со скоростью от 0,1 м/с до 6,5 м/с.

Результаты анализа проб на содержание Са приведены в табл. 1, из которой видно, что наибольшая степень усвоения Са наблюдается при скорости 4 м/с.

В этих условиях температура стали той же марки равна 1590 °С, толщина оболочки ПП и ее диаметр равны соответственно 0,4 мм и 13 мм. Глубина жидкой ванны – 6 м.

Использование формулы (10) с найденным значением γ дает: V_p=4,3 м/с, что лишь

Табл. 1. Остаточное содержание Са в стали и степень его усвоения при различных скоростях ввода ПП СК30 в ковш на УДМ

Скорость ввода ПП, м/с (кол-во плавок)	Содержание Са, мас, %		Процент усвоения Са
	2-1	2-2	
1	2	3	4
2(15)	<0,0005	0,0022-0,0032 0,0027	9,2-11,9 10,6
3 (17)	<0,0005	0,0025-0,0035 0,0030	10,4-13,0 11,7
4 (20)	<0,0005	0,0030-0,0050 0,0040	12,5-18,5 15,5
5 (18)	<0,0005	0,0028-0,0040 0,0034	11,7-14,8 13,2
6 (19)	<0,0005	0,0023-0,0033 0,0028	9,5-12,2 10,9

Примечание: 2-1 – проба из стальковша на УДМ после первой усреднительной продувки аргоном (до ввода в расплав ПП); 2-2 – проба из стальковша на УДМ после второй усреднительной продувки (после ввода в расплав ПП).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Загрязненность стали 09Г2ФБ комплексными кислородосодержащими включениями

Скорость ввода ПП, м/с	Загрязненность, балл средний			
	Осевая зона листа		1/3 толщины листа	
	Общ. объем, %	ΣL /*S*, см/см^2	Общ. объем, %	ΣL /*S*, см/см^2
2	0,0140	1,29	0,0111	0,79
4	0,0108	0,54	0,0080	0,14
6	0,0137	1,23	0,0094	0,68

незначительно расходится с опытно-промышленным значением (4,0 м/с).

Для оценки степени загрязненности металла комплексными кислородосодержащими включениями (по завершении гомогенизации жидкой ванны продувкой аргоном) проводили металлографические исследования образцов, взятых от штрипсов плавок (брали по 4 шлифа для каждой плавки: 2 – по осевой зоне и 2 – на расстоянии 1/3 толщины листа).

В качестве показателя эффективности технологии использовали величину, характеризующую суммарную длину этих включений в единице площади шлифа L_o/S_o см/см^2, L_o – суммарная длина включений; S_o – площадь шлифа. Результаты металлографических исследований приведены в табл. 2.

Оценка степени загрязненности металла комплексными кислородосодержащими включениями с различными режимами ввода ПП (см. табл. 2) показала, что при V_p снижение количества этих включений и их суммарной длины в единице площади шлифа наиболее существенно.

Для повышения эффективности раскисления стали используют порошковую проволоку с алюмокальциевым наполнителем [12,13].

Выводы

Формула (10), определяющая рациональную скорость ввода ПП в расплав стали, при которой наполнитель проволоки максимально усваивается металлом, обобщает эмпирическую формулу работы [8] за счет дополнительного учета диаметра ПП, который может отличаться на разных заводах. Эта формула, будучи полуэмпирической, допускает настройку на конкретные условия технологии путем определения параметра идентификации γ, что требует меньших затрат, чем получение новых эмпирических формул каждый раз при изменении этих условий.

Разработанная полуэмпирическая формула определяет энергосберегающий режим интенсификации процессов тепломассопереноса технологии обработки стали ПП с силикокальциевым наполнителем.

Список литературы

1. Rozman, A. Some operating result by introducing the steel treatment with Ca-Si cored wire in Slovenian steelworks // 1st Int. Calcium Treat. Symp. – London. – 1988. – P. 53-60.
2. Пеликани, Ф. Основы обработки стали кальцием и состояние усвоенного ею кальция / Ф. Пеликани, Б. Дюран, А. Гессье // Обработка стали кальцием. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. – С. 45-58.
3. Лю, Д. Исследование кинетики ввода кальцийсодержащей проволоки в сталь / Д. Лю, Д. Айронс, В. Лю // Обработка стали кальцием. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. – 1985. – С. 59-74.
4. Дюдкин, Д. А. Прецизионная обработка металлургических расплавов / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, И. А. Павлюченков. – М.: Теплотехник, 2007. – 424 с.
5. Martiner, R. The role of slog CaSi wire injection in metal // Proc. 6 th Int. Iron and Steel Congr. – Tokyo. – 1990. – P. 504-511.
6. Яковлев, Ю. Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов / Ю. Н. Яковлев // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства. – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия, 1991. – С. 32–44.
7. Рябов, А.В. Математическое моделирование обработки расплава порошковой проволокой / А.В. Рябов, Д.М. Неволин, В.И. Потапов // Вестник Южно-Уральского госуд. ун-та. – 2013. – Вып. 1. – Т. 13. – С. 17-21.
8. Пат. 2102500 Россия, МКИ С 21 С 7/06. Способ раскисления стали / Д. А. Дюдкин [и др.] // ОАО Завод «Универсальное оборудование». – № 97104998/02; заявл. 13.02.96; опубл. 20.01.1998.
9. Захаров, М.І. Математичні методи розрахунку та комп'ютерне моделювання металургійних процесів: навчальний посібник для металургійних спеціальностей вузів / М.І. Захаров, А.І. Троцан .– Донецьк – Маріуполь: Донбас, 2011. – 99 с.
10. Ylönen, H. Steel composition adjustment by wire feeding at Rautaruukki Oy Raahe Steel Works / H. Ylönen, J. Mikkola // Scandinavian Journal of Met-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

allurgy. – Vol.19. – No. 3. –1989. – P. 142-145.
11. Захаров Н.И. Об одном подходе к математическому моделированию процесов тепломассообмена в металлургических системах // Математичне моделювання. – 2006. – № 1, 2 (15). – С. 30-33.
12. Пат. 74435 Україна, С21С 7/00. Дріт для позапічної обробки металургійних розплавів / Дюдкін Дмитро Олександрович, Кисіленко Володимир Васильович. – № u 2012 04866; заявл. 18.04.2012; опубл. 25.10.2012, бюл. № 20.
13. Пат. 77067 Україна, С21С 7/00. Дріт для комплексної обробки металургійних розплавів / Кисіленко Володимир Васильович, Дюдкін Дмитро Олександрович. – № u 2012 08882; заявл. 18.07.2012; опубл. 25.01.2013, бюл. № 2.

N.I. Zaharov /Dr. Sci. (Eng.)/, I.V. Tupilko, E.V. Sapronova, I.V. Zyabrev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ENERGY-SAVING INTENSIFICATION MODE OF HEAT AND MASS TRANSFER IN PROCESSING OF MOLTEN STEEL WITH POWDER WIRE

Background. *The development of energy-saving modes of an intensification of metallurgical technologies on the basis of the similarity methodology is associated with the need to ensure equality of the same-name similarity criteria of a laboratory model and the real metallurgical unit. For multivariable technology, the number of criteria of similarity increases and the possibility of using this methodology is hampered.*
Materials and/or methods. *It is shown that a promising method of solving the problem of energy saving in metallurgical heat power at the intensification of technologies of the molten steel processing with powder wire (PW) is the combination of the results of computer modeling of processes of convective heat and mass transfer and pilot studies. The mathematical model is given for the problem of the powder wire – molten steel heat exchange in the ladle deoxidation process. A computer program for implementing this model is developed.*
Results. *Based on the results of computer simulation are analyzed stages of melting of PW with silicocalcium filler have been analyzed. The dependence obtained of the melting time of the PW sheath on the density of the heat flow directed to the surface of the wire. Using the obtained results of computer simulation and known calculation methods to determine the extent of calcium absorption by the molten steel a graph is built of its dependence on the PW input speed into a liquid bath and the PW diameter It is shown that the decrease of its diameter at a fixed mass flow of silicocalcium leads to an increase of the degree of calcium impact on the metal as well as the value of the optimal (rational) input rate of PW in the melt, the existence of which is shown based on computer modeling. The semi-empirical formula is proposed for the rational input speed of the powder wire into the molten steel for maximum absorption of the PW filler by the metal.*
Conclusion. *The pilot studies have confirmed the low error when using the formula to determine rational input speed of PW into a liquid bath. Recommendations are given for the efficient use of the wire in the process of ladle treatment of steel by reducing the real speed to the level of rational values that contributes to the solution of the problem of energy saving.*

Keywords*: powder wire, molten steel, oxide inclusions, energy saving, heat and mass transfer.*

Сведения об авторах

Н.И. Захаров
SPIN-код: 8653-7169
Scopus ID: 8947869000
Orcid ID: 0000-0002-1560-6561
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: teplophizika@yandex.ru

И.В. Тупилко
Телефон: +380 (50) 618-38-33
Эл. почта: irishhka89@gmail.com

Е.В. Сапронова
SPIN-код: 9994-8274
Orcid ID: 0000-0002-7554-8260
Телефон: +380 (62) 301-08-65
+380 (50) 603-87-10
Эл. почта: sapronova@list.ru

И.В. Зябрев
Телефон: +380 (99) 704-44-83
Эл. почта: zyabrev555@gmail.com

Статья поступила 29.04.2017 г.
© Н.И. Захаров, Е.В. Сапронова, И.В. Тупилко, И.В. Зябрев, 2017
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

УДК 621.43.057.5:665.733:543.41

Н.С. Лозинский /к.т.н./
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко» (Донецк)
Л.Р. Куницкая /к.х.н./
Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко (Киев)

ПРОЦЕДУРА ВЫЯВЛЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА И ФАЛЬСИФИКАТА АВТОМОБИЛЬНОГО БЕНЗИНА

Разработана процедура выявления альтернативного топлива и фальсификата автомобильного бензина по наличию в них добавок и/или присадок методом качественного химического анализа с использованием доступных и безопасных реагентов, не относящихся к прекурсорам.

***Ключевые слова**: альтернативное топливо, фальсификат автомобильного бензина, антидетонаторы, качественный химический анализ.*

Постановка проблемы

Фальсифицированный (суррогатный, контрафактный, поддельный), не отвечающий требованиям действующего стандарта (ГОСТ [1]) «автомобильный бензин» – это, как правило, доступная органическая матрица (например, стабильный газовый и прямогонный бензины или их композиции, а также головная фракция рафината (ГФР) сырого бензола), допированная антидетонационными компонентами и присадками или их смесями. Среди последних самое широкое распространение получили: ферроцен (ФЦ), соединения марганца (циклопентадиенилтрикарбонилмарганец (ЦТМ) и метилциклопентадиенилтрикарбонилмарганец (МЦТМ), например, под торговой маркой Hitec), N-монометиланилин (ММА), продукты коксохимического производства, в частности: сырой бензол (СБ), компонент моторного топлива ароматический (КМТА), фракция бензол-толуол-ксилолы (БТК), фракция бензол-толуольная (бентол – БТ), толуольный концентрат и/или сольвенты (С), а также превышающие нормы по содержанию спирты: этанол, метанол, наконец – вода.

По оценкам ведущих экспертов Российской Федерации и Украины, сегмент фальсификата на рынке нефтепродуктов составляет треть от реализуемого топлива через сети автозаправочных станций и комплексов (АЗС, АЗК) и постоянно расширяется в силу повышения спроса и розничной цены на автомобильный бензин, а также низкой эффективности контроля над качеством реализуемого горючего со стороны соответствующих государственных структур.

В связи с этим потребителю в качестве защитной меры от недобросовестных нефтетрейдеров предлагаются рекомендации и тест-системы, позволяющие избегать заправки автомобиля фальсификатом и выявлять некоторые из указанных выше антидетонаторы [2-4].

Анализ последних исследований и публикаций

ФЦ в суррогате обнаруживают как без предварительного разложения пробы, так и после ее минерализации монохлоридом йода, по реакции с гексацианоферратом (III) калия, сульфосалициловой кислотой, *о*-фенатролином, а также гваяковой кислотой, амидопирином или бензидином с перекисью водорода [3-4].

Обнаружению ММА в фальсификатах посвящено большое число публикаций, которые собраны в обзоре [5]. Предложенные методики требуют применения малодоступных и токсичных органических реагентов: бензсульфохлорида, *п*-толуолсульфохлорида, фурфурола, 5-хлор-4,6-динитробензофуразана, β-нафтола и других [5-11].

Соединения марганца обнаруживают перйодатным окислением предварительно обработанной пробы бензина раствором брома в четыреххлористом углероде [12,13].

Коллоидную воду предложено обнаруживать по выпавшему льду, по реакциям со смесью ферроцианида калия и сульфата железа, с калий-тиоционатом кобальта, со смесью гексацианоферрата (II) и гексацианоферрата (III) калия, фенолфталеина со щелочью и азотнокислым серебром с бромфеноловым синим [14-19].

Спирты в контрафакте обнаруживают по реакциям с гексанитратоцератом (IV) аммония, бихроматом калия в сернокислой или азотнокислой среде, реактивом Джонса (хромовым ангидридом), 3,5-динитробензоилхлоридом в среде пиридина, йодидом и персульфатом калия (йодоформная проба), сероуглеродом и сульфатом меди (II) (ксантогеновая проба), хромотроповой

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

кислотой (1,8-диоксинафталинсульфоновая кислота) и фуксином – специфичные реакции на метанол в присутствии этанола, солью *о*-карбоксифенилдиазония – специфичная реакция на этанол в присутствии метанола, 8-оксихинолинатом ванадия (V), ванадатом аммония и сульфосалициловой кислотой, *о*-нитробензальдегидом после предварительного окисления, с ванилином, а также по окрашиванию пламени сложными эфирами борной кислоты [7,9,20-29].

Использование предлагаемых методов и тест-систем ограничивается рядом причин. Во-первых, малой доступностью, в том числе из-за использования прекурсоров, и токсичностью реактивов. Во-вторых, предлагаемые тест-системы позиционируются производителем как «определители качества» бензина, но, по сути, позволяют установить наличие антидетонатора одного класса, что может ввести в заблуждение. Например, если для определения «качества» бензина использовалась тест-система на ФЦ и тест дал отрицательный результат, то это не означает, что в образце не окажутся ЦТМ или ММА. Как следствие, наметившееся использование комплексных антидетонационных присадок и добавок требует не только знания методов и наличия тест-системы на конкретную добавку или присадку, а специально разработанной процедуры, позволяющей проводить контроль образца, содержащего сложную смесь антидетонаторов.

Цель (задачи) исследования

Целью данного исследования является разработка эффективной и простой процедуры выявления альтернативного и/или фальсифицированного бензина по наличию в них добавок и/или присадок силами не имеющего специального химического образования автолюбителя или топливной лаборатории нижнего звена, в том числе в полевых условиях.

Основной материал исследования

Для реализации процедуры необходимы следующие доступные реактивы, лабораторная посуда и оборудование:

– насыщенный раствор оксид хлорида кальция (хлорной извести) или средство «Белизна» любого производителя;

– 3 %-ный раствор хлорного железа: 3,4 г шестиводного хлорного железа растворяют в 100 мл дистиллированной воды и подкисляют раствором соляной кислоты для предотвращения гидролиза. Полученный раствор имеет бледно-желтый цвет;

– борная кислота кристаллическая;

– 10 %-ный раствор соляной кислоты (набор «Юный химик»);

– 10 %-ный раствор серной кислоты (набор «Юный химик»);

– 10 %-ный раствор гидроксида калия (набор «Юный химик»);

– 1 %-ный раствор щавелевой кислоты: 1 г щавелевой кислоты растворяют в 100 мл дистиллированной воды;

– настойка йода аптечного;

– 5 %-ный водный раствор ферроцианида калия (желтая кровяная соль): 5 г желтой кровяной соли растворяют в 100 мл дистиллированной воды;

– 15 %-ный водный раствор роданид калия (аммония): 15 г роданид калия (аммония) растворяют в 75 мл дистиллированной воды;

– дистиллированная вода;

– кварцевая лампа;

– ареометры АН, АНТ-1 или АНТ-2 с диапазонами (кг/м^3): 740-770, 710-770 и 750-830, соответственно;

– цилиндр для ареометров;

– фарфоровая чашка;

– стеклянная палочка;

– спиртовая горелка или сухой спирт;

– пробирки с пробками из набора «Юный химик» или иная посуда (пенициллиновые пузырьки, мензурки и т.п.);

– мерная пробирка с притертой пробкой на 100 мл, мерный цилиндр или другой мерный сосуд (пробирка, мензурка и т.п.), позволяющая наблюдать за изменением объемов несмешивающихся жидкостей;

– бытовой холодильник с морозильной камерой или охлаждающие смеси [30];

– активированный уголь.

Методы исследования – качественный химический анализ, определение плотности с помощью ареометра и наблюдение за окрашиванием пламени при горении образца.

Процедура выявления фальсифицированного бензина состоит из следующих последовательно-параллельных стадий:

– визуальный осмотр;

– наблюдение за пламенем горящего образца;

– вымораживание;

– кварцевание;

– определение плотности при температуре 15 ^{o}C;

– проведение качественных реакций.

Поскольку согласно действующему ГОСТ 32513-2013 бензин должен быть чистым и прозрачным, окрашенное красителями горючее [1,п.4.4)] предварительно осветляют, взбалтывая

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

с активированным углем, и отфильтровывают, то визуальный осмотр позволяет предположить наличие в тестируемом объекте следующих присадок и добавок [1]:

– ФЦ, если топливо окрашено в интенсивный лимонно-желтый цвет;

– ММА, если бензин имеет темный оттенок. При стоянии интенсивность цвета такого суррогата постепенно усиливается. Кварцевание ускоряет процесс.

– ЦТМ, МЦТМ, если после стояния на солнце или облучения кварцевой лампой жидкость темнеет, и в ее объеме появляются хлопья черного цвета, постепенно осаждающиеся на дно емкости;

– КМТА (БТК, СБ, БТ и С), если жидкость имеет коричневый цвет различного оттенка, от светлого до темного тона. При стоянии и/или кварцевании такой суррогат становится темно-коричневым, из него выпадает осадок на дно и стенки емкости хранения;

– спиртов (других оксигенатов) в количествах, превышающих допустимые по ГОСТ, если бензин совершенно бесцветный, а не бледно-желтого цвета, как у товарного горючего.

Прежде чем приступать к химическим тестам следует провести «картинг-тест» на наличие воды и спирта [31-33].

Процедура выглядит следующим образом:

– заполняют пробирку или мерный цилиндр водой в объеме 25 % от общего объема мерной посуды;

– оставшиеся 75 % объема пробирки или цилиндра заполняют образцом топлива;

– пробирку или цилиндр закрывают пробкой (резиновой, полиэтиленовой или притертой стеклянной) и встряхивают, чтобы тщательно перемешать образец с водой;

– пробирку или цилиндр устанавливают в вертикальное положение и ожидают расслоения эмульсии. Если наблюдается смещение границы раздела водного и органического слоев вверх по пробирке или цилиндру, то это свидетельствует о наличии в данном топливе спиртов, которые из органического перешли в водный слой.

Можно ограничиться этой информацией, однако можно выполнить полуколичественную оценку содержания спиртов в контролируемом образце [32].

Если тест проведен в цилиндре на 100 мл, то исходные объемы, занимаемые топливом (F) и водой (W), будут равны 75 мл и 25 мл соответственно. Предположим, что после смешивания объем нижней (водной) фазы увеличился на величину D (мл) из-за перехода оксигенатов из образца в воду. Тогда количество бензина в образце составит $F–D$ мл, а относительное содержание спирта – $D/F*100$.

Например, если граница раздела фаз переместилась на 5 мл, то процент воды и спирта в контролируемом образце составит величину 5/75*100=6,7 % [32].

Поскольку количество присутствующих спиртов не должно превышать, об. % [1]: 1 – для метилового спирта и 5 – для этилового спирта, то образец, взятый для примера, является фальсификатом. При еще большем содержании спиртов (до 10, 40 или 85 об. %) образцы отвечают альтернативным спиртосодержащим топливам (Е-10, Е-40 и Е-85).

Для выделения спиртов из углеводородных растворов вместо воды, как описано в процедуре, можно применить водные растворы калиевых, натриевых или аммониевых солей органических кислот: масляной, валериановой или других [34]. При этом процесс необходимо проводить при температурах в интервале 30-60 ºС.

Присутствие спиртов в полученном водном слое подтверждают следующим образом. В фарфоровую чашку помещают небольшое количество борной кислоты, смачивают несколькими каплями водной вытяжки (вместо нее можно использовать непосредственно несколько капель контролируемого топлива) и перемешивают стеклянной палочкой. Полученную кашицу этой же палочкой вносят в пламя спиртовой горелки или сухого спирта. При этом летучие метилбораты, если в образце был метиловый спирт, окрашивают пламя в зеленый цвет, а этилбораты, если в образце был этиловый спирт, окрашивают в зеленый цвет только кайму пламени. Заметим, что проведение этого опыта требует определенных навыков, так как довольно трудно отличить аналитический эффект спиртов. Пламя альтернативного спиртосодержащего топлива практически не отличается от пламени этилового спирта.

Заметим, если цвет пламени голубой с бледно-лазурным оттенком, а в наружной части пламени с зеленым, то это может свидетельствовать о присутствии в пробе соединений свинца. Для проверки наличия свинца смешивают 20 мл контролируемого бензина с 20 мл аптечного йода и кипятят. Через некоторое время водную фазу выливают в фарфоровую чашку и упаривают до объема 5-10 мл, далее переливают в пробирку и оставляют для охлаждения. При наличии свинца по всему объему пробирки будут видны золотисто-желтые блестки. Если пробирку нагреть до кипения, блестки растворятся, но по мере охлаждения жидкости появятся снова.

Вместе с тем, появление фальсификатов со свинцовыми антидетонаторами маловероятно,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

так как они запрещены к применению на территории России и Украины еще с 2003 г.

Возвращаясь к подтверждению присутствия этилового спирта в контролируемой пробе, следует применить самую доступную в быту методику – йодоформную пробу.

В пробирку с водной вытяжкой «картингтеста» прибавляют 1-2 кристаллика йода, полученного из настойки аптечного йода. Смесь нагревают и подливают понемногу 10 %-ный раствор гидроокиси калия до обесцвечивания избытка йода. Если в пробе присутствует этиловый спирт, то при охлаждении выпадают кристаллы йодоформа. При малой концентрации спирта явно ощущается лишь запах йодоформа, а кристаллы образуются после более или менее длительного стояния (например, на следующий день). Следует отметить, что топливо со значительным содержанием спиртов окрашивается йодом в коричневый цвет, тогда как бензин без оксигенатов – в сиреневый.

Наличие ФЦ в пробе выявляют с помощью раствора хлорного железа. К нескольким каплям пробы в лабораторной пробирке добавляют столько же капель слегка подкисленного 3 %-го раствора хлорного железа. Пробирку закрывают и интенсивно встряхивают. В случае присутствия ФЦ наблюдают изменение цвета водной фазы с бледно-желтого на ярко-зеленый. Помимо ФЦ хлорное железо реагирует с ММА. Поэтому при ином аналитическом эффекте из пробы следует удалить ММА – вымыть слабым раствором щавелевой кислоты. При наличии ММА водный слой вытяжки окрашивается в бледно-розовый цвет. Его отбрасывают, проверяют полноту экстракции ММА в отобранной части органической фазы, как описано ниже. При положительном эффекте экстракцию повторяют до полного удаления ММА, а наличие ФЦ определяют в органической фазе, как было описано.

Для определения ФЦ можно также добавить к 2-3 мл пробы столько же доступного окислителя, например, раствор хлорной извести или средство «Белизна», и несколько капель минеральной кислоты (происходит интенсивное выделение газа, соблюдать осторожность!). Наблюдается потемнение объема пробы, сопровождающее окисление иона Fe^{2+} ферроцена в гидратированный ион Fe^{3+}, присутствие которого подтверждают пробой с роданидом калия (аммония) или железистосинеродистым калием (желтая кровяная соль).

В первом случае в пробирку помещают 1 мл контролируемого образца, 2-3 капли 10 %-ного раствора HNO_3 и 1 мл 15 %-ного раствора роданида калия или аммония. При наличии ионов Fe^{3+} появляется кроваво-красное окрашивание.

Во втором случае в пробирку вносят 2-3 капли контролируемого образца, добавляют 3-4 капли дистиллированной воды, 1-2 капли 10 %-ной соляной кислоты и 2 капли 5 %-ного раствора ферроцианида калия. В присутствии катионов Fe^{3+} образуется синий осадок или наблюдается окрашивание раствора в этот цвет, при малом содержании железа.

ММА в пробе обнаруживают следующим образом. К нескольким каплям пробы добавляют столько же капель насыщенного раствора хлорной извести или средства «Белизна» и интенсивно встряхивают. Затем добавляют несколько капель раствора минеральной кислоты (происходит интенсивное выделение газа, соблюдать осторожность!) и снова интенсивно встряхивают. При наличии ММА раствор приобретет интенсивно-синий цвет.

Наличие ЦТМ и/или МЦТМ в образце проявляется потемнением топлива и последующим выпадением в его объеме хлопьев черного цвета после стояния на ярком солнце или под действием излучения кварцевой лампы.

Суррогат, полученный с использованием КМТА (БТК, СБ, БТ и С), проще выявить нехимическими методами:

– измерением плотности исследуемого образца ареометром, так как эти компоненты характеризуются высокой плотностью. Если при 15 ^oC плотность контролируемого образца превышает 780 кг/м^3, то он, скорее всего, является фальсификатом;

– вымораживанием, так как температура плавления бензола 5,5 °С. При температурах около минус 25 ^oC (в морозильной камере или охлаждающей смеси) можно наблюдать выпадение кристаллов бензола (кроме добавки С). Заметим, что эту процедуру следует проводить после того, как получены данные об отсутствии в образце воды, как показано ниже, или после ее удаления;

– по характеристике пламени горения. Поскольку молекулы, составляющие КМТА (БТК, СБ, БТ и С), по углеводородному составу имеют отношение СН близкое к 1:1, то требуют для полного сгорания много кислорода. Поэтому топливо, содержащее этот класс добавок, горит ярким и сильно коптящим пламенем.

Химическим способом подтвердить наличие КМТА (БТК, СБ, БТ и С) можно по реакциям на присутствие бензола, конденсированных ароматических углеводородов (например, нафталина) и/или серосодержащих соединений: тиофена и/или меркаптанов. Однако для их проведения потребуются ядовитые (цианид калия, формальдегид, соли свинца и/или ртути), а также мало-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

доступные и токсичные, например изатин, а также отнесенные к прекурсорам (концентрированная серная кислота) реактивы, что выходит за рамки рассмотрения данной работы [35].

Коллоидную воду можно обнаружить вымораживанием, поместив закрытую прозрачную емкость с контролируемым образцом в морозильную камеру холодильника или в охлаждающую смесь при температуре не ниже минус 5 °С. Появление кристалликов льда будет свидетельствовать о наличии воды, бензол из образца, как сказано выше, будет кристаллизоваться при более низких температурах.

Выводы

Предложена процедура выявления альтернативного топлива и фальсификата автомобильного бензина по наличию в них добавок и/или присадок качественным химическим анализом с использованием доступных и безопасных реагентов, не внесенных в список прекурсоров. Простота выполнения процедуры делает ее доступной для применения в быту автолюбителем, не имеющим специальной подготовки и квалификации, и в лабораториях нижнего звена из-за их низкой оснащенности, в том числе в полевых условиях.

Список литературы

1. ГОСТ 32513–2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. – Введ. 2015–01–01. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 16 с.
2. Лозинский, Н.С. Как избежать заправки автомобиля фальсификатом / Н. С. Лозинский // Нефтепродукты. – 2013. – 28(728). – С. 6, 29(729). – С. 6.
3 Определение железа в автомобильном бензине / О.М. Панадий [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 1996. – № 5. – С.51.
4. Пат. 2267124 РФ, МПК[7] G01N31/22, G01N21/78, G01N33/22. Колориметрический способ определения наличия железа в автомобильном бензине / Е.И. Алаторцев [и др.]; ФГУП «25 Государственный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации» (по применению топлив, масел, смазок и специальных жидкостей – ГосНИИ по химмотологии). – №2004130192/0; заявл. 13.10.2004; опубл. 27.12.2005. – 6 с.
5. Химический и физико-химический анализ бензинов, содержащих ароматические амины / Н.С. Лозинский, А.Н. Рокун, А.В. Павловский, Ю.А. Павловская, В.В. Ярошенко; Донец. нац. ун-т. – Донецк, 2008. – 63 с. – Библиогр.: с. 62-63. – Деп. в ГНТБ Украины. 04.04.08, № 30-Ук2008.
6. Володина, Г.Б. Лабораторный практикум по органической химии / Г.Б. Володина, И.В. Якунина. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2004. – 80 с.
7. Лабораторные работы по органической химии: учеб. пособие для химико-технологических специальных вузов / Под ред. О.Ф. Гинзбурга и А.А. Петрова. Изд. 3-е. – М.: Высш. школа, 1974. – 286 с.
8. Бейерман, К. Определение следовых количеств органических веществ: пер. с англ. / К. Бейерман. – М.: Мир, 1987. – 29 с.
9. Майер, Г. Анализ и определение органических соединений: пер. с нем. / Г. Майер. – Л.: Онти-Химтеорет, 1937. – 457 с.
10. Пат. 2489715 РФ, МПК[7] G01N33/22, G01N31/22. Способ определения монометиланилина в автомобильном бензине индикаторным тестовым средством / В.М. Островская, С.М. Сергеев, О.В. Шарапа; ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», ФГБУ науки «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН)». – №20121339689/15; заявл. 18.09.2012; опубл. 10.08.2013. – 9 с.
11. Пат. 2425366 РФ, МПК[7] G01N33/22, G01N31/22. Способ качественного и количественного определения содержания монометиланилина в автомобильном бензине / Л. В. Красная [и др.]; ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России». – №2010146581/15; заявл. 17.11.2010; опубл. 27.07.2011. – 7 с.
12. Steinke, E.D. Spectrophotometric determination of manganese in gasoline / E.D. Steinke, R.A. Jone, V. Brandt // Analyt. Chem. – 1961. – No. 1.Vol. 33. – P. 101-102.
13. Танаев, Н.А. Капельный метод / Н.А. Танаев – М.-Л.: Госхимиздат, 1954. – 272 с.
14. Пат. 2387993 РФ, МПК[7] G01N33/22. Способ определения содержания воды в жидком топливе в бытовых условиях / П.В. Кузин, А.А. Жиздюк, В.А. Абрамов; ФГОУ профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова». – № 2008149678/28; заявл. 16.12.2008; опубл. 27.04.2010. – 5 с.
15. Пат.2375713 РФ, МПК[7] G01N33/22, G01N31/22. Химический сенсор для определения воды в моторных топливах / А.Е. Алыкова, Н.М. Алыков; ГОУВПО «Астраханский государственный университет». –

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

№ 2008134929/04; заявл. 26.08.2008; опубл. 10.12.2009.– 4 с.
16. Пат. 2185621 РФ, МПК[7] G01N31/22, G01N33/18. Индикаторная бумага для определения границы и уровня раздела фаз нефтепродуктов и воды / В. М. Островская, В. Н. Кирпичников, С. И. Абдурагимов; ООО «Внедренческое научно-производственное предприятие «Экология, ракетная техника, околоземный Космос». – №2001100311/042007121941/04; заявл. 09.01.2001; опубл. 20.07.2002. – 7 с.
17. Пат. 2249207 РФ, МПК[7] G01N33/22, B01D39/00. Индикатор качества жидкого углеводородного топлива / Ю.Н. Филатов [и др.]; ООО «Нанотехнологические материалы БАЛТИКА» (ООО «НТМ БАЛТИКА»), Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова. – № 2003131001/15; заявл. 21.10.2003; опубл. 27.03.2005. – 4 с.
18. А.с. 1647402 СССР, МКИ[3] G01 N 31/22. Водочувствительная паста / В.А. Кузнецов [и др.]; – № 4646610; заявл. 03.02.1989; опубл. 07.05.1991. Бюл. 17. – 2 с.
19. Пат. 2042132 РФ, МПК[7] G01N33/22, B01D39/00. Водочувствительная паста для определения границы раздела воды с нефтепродуктами / В.А. Кузнецов, С.А. Альмендеев, Р.Б. Касаткин; Ульяновское высшее военно-техническое училище им. Богдана Хмельницкого. – № 92006437/04; заявл. 16.11.1992; опубл. 20.08.1995. – 4 с.
20. Критчфилд, Ф. Анализ основных функциональных групп в органических соединениях: пер. с англ. / Ф. Критчфилд. – М.: Мир, 1965. – 206 с.
21. Идентификация органических соединений: пер. с англ. / Р. Шрайнер [и др.]. – М.: Мир, 1983. – 703 с.
22. Органикум. Практикум по органической химии. Том II: пер. с нем. / Г. Беккер [и др.]. – М.: Мир, 1979. – 443 с.
23. Пат. 2258929 РФ, МПК[7] G01N33/22. Способ определения содержания спирта в автомобильном бензине. - научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации (по применению топлив, масел, смазок и специальных жидкостей ГосНИИ по химмотологии)». – № 2004115399/04; заявл. 21.05.2004; опубл. 20.08.2005. – 5 с.
24. Файгль, Ф. Капельный анализ органических веществ: пер. с англ. / Ф. Файгль. – М.: Госхимиздат, 1962. – 836 с.
25. Kottász, J. A metilalkoholtartalom mikromeghatározása etilalkoholban és gyümölcspárlatokban. [Tekst] / J. Kottász, K. Römer // Élelmezési ipar. – 1953. – F. 7, №11. – O. 347-351 (РЖХ.- 1955, №7. – 13029).
26. Мазор, Л. Методы органического анализа: пер. с англ. / Л. Мазор. – М.:Мир,1986. –584 с.
27. Satyanarayana, D. Vanadium (V) – sulphosalicylic acid complex as a reagent for the detection of alcohols / D. Satyanarayana, N. Kunnayya, V.Pandu Ranga Rao // Indian J. Chem. – 1963. – No. 3. Vol.1. – P. 141.
28. Бауер, К. Анализ органических веществ. – 2-е перераб. и доп. изд-е: пер. с нем./ К. Бауер. М.: Издатинлит, 1953. – 488 с.
29. Ходик, А.С. Об определении малых концентраций этилового алкоголя / А.С. Ходик // Аптеч. дело. – 1953. – № 2. Т.2. – С. 69-71.
30. Коростелев, П.П. Приготовление растворов для химико-аналитических работ. – 2-е перераб. и доп. изд-е / П.П. Коростелев. – М.: Наука, 1964. – 202 с.
31. Шурпаков, В.А. Классификация и технические требования к гоночным автомобилям «Карт» / В.А. Шурпаков, М.В. Селявко // Мн.: Белорусская федерация картинга, 2012. – 29 с.
32. Hebert, James W. Ethanol Fuel Testing. Determining ethanol content in blended gasoline fuels: [Электронный ресурс]. – http://continuouswave.com/whaler/reference/ethanolTest.html
33. James W. HebertDetermining ethanol content in blended gasoline fuels. Method of determining water and alcohol content in gasoline: [Электронный ресурс]. – http://www.avalonpetroleum.com/phaseseperation.html
34. Pat. 691688 Great Britain CI C07C29/74. Improvements in or relating to a process of separating organic oxygenated compounds from hydrocarbon solutions / applicant(s): STANOLIND OIL & GAS CO. – № GB19500004001.
35. Rosenthaler, L. Zur Prüfung von Petrolather, Benzin und Weingeist auf Benzol / L. Rosenthaler // Pharmac. acta helv. – 1958. – No.11-12.Vol. 33. – P. 858-859.

N.S. Lozynskyy /Cand. Sci. (Eng.)/
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)
L.R. Kuniskaya /Cand. Sci. (Chem.)/

Taras Shevchenko National University (Kyiv)

THE PROCEDURE FOR IDENTIFYING ALTERNATIVE FUEL AND ADULTERATION OF GASOLINE

Background. *A detailed review of the scientific and patent literature is made, dedicated to qualitative chemical analysis to identify alternative gasoline and adulterated fuel. It is established that adulterated gasoline can be identified by the presence in its composition of the compounds having effective anti-knock properties prohibited for use in transport. It is primarily ferrocene, manganese compounds, and the products of coke production – aromatic component of motor fuels, N-monomethylaniline and colloidal water. It is shown that the proposed methodology requires the use of reagents not readily available, toxic or included in the list of precursors.*

Materials and/or methods. *Research methods – qualitative chemical analysis, determination of density using the hydrometer and observing the coloration of the flames of the burning sample. Available reagents and laboratory glassware to the extent of the set of "Young Chemist".*

Results. *The procedure for the identification of alternative fuels and adulteration of automobile gasoline by qualitative chemical analysis using readily available and safe reagents and substances not included in the list of precursors is proposed. According to the procedure alcohols are detected by the change in the volume of water extraction and flame coloration by esters of boric acid and iodoform reaction (ethyl alcohol); ferrocene – by a colour change of the aqueous solution of ferric chloride and potassium thiocyanate (ammonium) and potassium ferrocyanide after the sample treatment by sanitary means ("Belisna");* N-monomethylaniline *– by staining samples after the treatment by "Belisna" and a solution of mineral acid; manganese antiknock – by the appearance of black flakes after irradiation of the sample by the light source. With the joint presence in the sample of ferrocene and N-monomethylaniline, the latter is eluted with 1 % solution of oxalic acid. In addition to the qualitative chemical analysis, the control procedure involves the fixation of the sample color as well as available physical and chemical methods – freezing to detect water and products of coke production, determination of density using hydrometer – for the detection of aromatic component of motor fuels, and observation of flame during combustion for the detection of alternative gasoline and the products of coke production. It is shown that the intense yellow color may indicate the presence of ferrocene in the sample; darker shade –the presence of N-monomethylaniline; brown with varying shades from light to dark tone – the presence of an aromatic component of motor fuels; the lack of coloring – a large number of alcohols.*

Conclusion. *The simplicity of the tests makes them available for performing in the home and laboratory conditions.*

Keywords: *alternative fuel, adulteration of gasoline, antiknock additives, high-quality chemical analysis.*

Сведения об авторах

Н.С. Лозинский
Телефон: +380 (62) 311-68-69
+380 (66) 574-25-08
Эл. почта: lozinsky58@mail.ru

Л.Р. Куницкая
Телефон: +380 (50) 469-15-21
Эл. почта: larisa_kuniskaya@ukr.net

Статья поступила 18.07.2017 г.
© Н.С. Лозинский, Л.Р. Куницкая, 2017
Рецензент к.т.н., доц. И.Г. Дедовец



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 662.61

А.Б. Бирюков /д.т.н./, В.А. Семергей
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫГОРАНИЯ ПОЛИФРАКЦИОННОГО ФАКЕЛА

Исследована параметрическая чувствительность математической модели выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла. При этом рассмотрено влияние погрешности задания таких параметров, как диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, расчетная плотность частиц топлива, константа скорости реакции горения углерода, температура продуктов сгорания на содержание остаточного углерода. Установлено, что наибольшее влияние оказывают расчетная плотность частиц топлива и температура продуктов сгорания, а погрешности задания диффузионного числа Нуссельта, коэффициента молекулярной диффузии и константы скорости реакции оказывают умеренное влияние порядка 0,7-2 % изменения результата на 1 % изменения параметра. Показано, что использование средней температуры продуктов сгорания в топке котла вместо реального пространственно-временного закона ее изменения приводит к погрешности определения остаточного углерода порядка 5 %.

***Ключевые слова**: угольная пыль, энергетический котел, диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, константа скорости реакции.*

Постановка проблемы

При создании математических моделей технологических процессов особую роль играет изучение вопроса о влиянии неточности задания параметров процесса на погрешность определения искомых величин. Исследование моделей с этой точки зрения носит название исследования параметрической чувствительности модели.

Как правило, оно реализуется путем проведения нескольких серий численных экспериментов. При этом задаются базовые значения всех параметров модели, а в каждой из серий численных экспериментов варьируется значение только одного параметра (остальные параметры остаются на базовом уровне). Анализ результатов численных экспериментов в пределах каждой серии позволяет выявить степень влияния параметра на искомую величину. В последующем при использовании математической модели к заданию параметров, имеющих значительную степень влияния на искомые величины, следует подходить особенно тщательно. Характеристики параметрической чувствительности модели должны быть учтены на стадии адаптации математической модели.

Анализ последних исследований и публикаций

В последнее время разработано значительное количество моделей выгорания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов [1-5]. Для использования математических моделей в практических условиях в качестве прогнозного компонента значительный интерес представляют упрощенные быстродействующие модели. Модель такого плана разработана в работе [5]. Для ее дальнейшего использования необходимо провести исследование параметрической чувствительности модели. Эта математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла базируется на рассмотрении системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. При этом парциальное давление кислорода в каждый момент времени определяется на основании рассмотрения одновременного выгорания частиц всех фракций. При проведении численных экспериментов для типовых условий эксплуатации котла ТП-100, сжигающего антрацитовую пыль, показана достаточная для предварительного рассмотрения степень соответствия расчетных и практических данных о доле несгоревшего углерода и величине механического недожога. Доказано, что результат определения доли несгоревшего углерода (в дальнейшем остаточного углерода) существенно зависит от количества выделенных для рассмотрения фракций пыли. Также на основании анализа расчетных данных об изменении остаточного углерода и скорости выгорания углерода сделан вывод о целесообразно-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

сти предварительной тепловой обработки пыли для уменьшения времени задержки воспламенения частиц в топке котла. Для адаптации данной модели к условиям конкретных энергетических котлов и ее дальнейшего эффективного использования важно провести процедуру исследования параметрической чувствительности, например, с использованием опыта работ [6-7].

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела.

Основной материал исследования

В основе математической формулировки данной модели лежит рассмотрение системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. Порядок химической реакции принят равным 1 по кислороду как компоненту, находящемуся в недостатке. Считается, что конечным продуктом горения является CO_2, а горением CO в пределах пограничного слоя можно пренебречь. Исходя из этого, используется следующий шаблон записи этого уравнения:

$$\frac{d\delta_i}{d\tau} = \frac{P}{RT}\cdot 0{,}21\cdot\frac{2\cdot M_C}{\rho_к}\cdot\frac{V_к^0}{V_г}\times \times\frac{k_r}{1+\left(\frac{1}{Nu_D}\right)\cdot\frac{k_r\cdot\delta_i}{D}}\times \times\left[(\alpha-1)\cdot\frac{V^0}{V_к^0}+G\right], \quad (1)$$

где δ – размер частицы, м; P – давление в топочной камере, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – текущее значение температуры поверхности частицы, К; $\rho_к$ – расчетная плотность частиц топлива, кг/м^3; M_C – молярная масса углерода, кг/кмоль; V^0 – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля, нм^3/кг; $V_г$ – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1кг угля, нм^3/кг; $V_к^0$ – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м^3/кг); k_r – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частицы топлива, м/с; Nu_D – диффузионное число Нуссельта; D – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м^2/с; G – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка, кг; α – коэффициент расхода воздуха.

Под расчетной плотностью частиц топлива понимается кажущийся удельный вес частиц угольной пыли после полной возгонки летучих и мысленного удаления золы из объема частицы.

На основе анализа уравнения принято решение провести анализ чувствительности модели к точности задания следующих параметров: диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, расчетная плотность частиц топлива, константа скорости реакции, температура продуктов сгорания.

Численные эксперименты по исследованию выгорания полифракционной пыли проведены для условий котла ТП-100 одной из электростанций Донбасса.

Состав угля, поступающего на горелки котла, %: C^c=90; H^c=4; N^c=0,94; O^c=4; S^c=1,06; A^c=19; W^p=0,7. Объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля заданного состава, и удельный выход продуктов сгорания в действительных условиях определены при помощи стандартных расчетных зависимостей, используемых в теории горения топлива [2]: V^0=7,367 м^3/кг, $V_г$=9,069 м^3/кг.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из аэрационного пылепитателя (АПП) промежуточного бункера пыли (табл. 1).

Время выгорания для исследования параметрической чувствительности задано на уровне 2,8 с (по опыту работы [5]). Временной шаг для решения системы уравнений численным методом выбран таким образом, что его дальнейшее уменьшение приводит к уточнению результата не более чем на 0,001 %.

Базовые значения выбраны для исследований параметров согласно [5] и установлены на следующих уровнях: диффузионное число Нуссельта Nu_D – 2; коэффициент молекулярной диффузии

Табл. 1. Ситовый анализ пыли, отобранной из (АПП) промежуточного бункера пыли

№ п/п	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16-0,125	2,1
2	0,125-0,104	4
3	0,104-0,083	4
4	0,083-0,063	3,9
5	0,063-0,040	10,4
6	0,040-0	75,6
Итого		100,0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

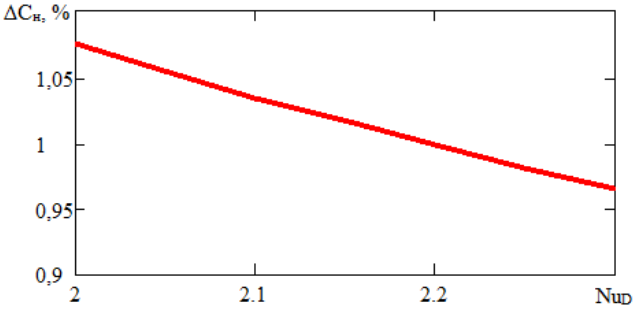


Рис. 1. Влияние диффузионного числа Нуссельта на общую величину остаточного углерода

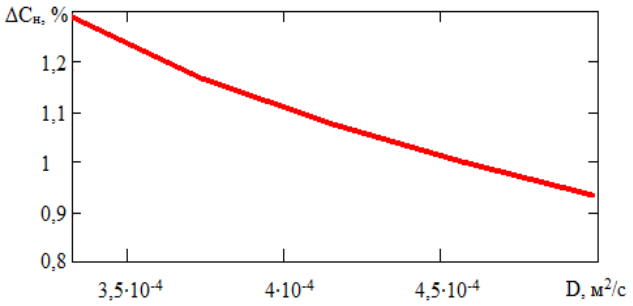


Рис. 2. Влияние коэффициента молекулярной диффузии на общую величину остаточного углерода

D – $4{,}15 \cdot 10^{-4}$ м^2/с; плотность частиц топлива $\rho_к$ – 958 кг/м^3; константа скорости реакции горения углерода k_r – 4,5 м/с; температура продуктов сгорания в топке T – 1800 К. Сущность исследования заключается в имитации погрешности в задании каждого из параметров по отдельности и сравнении результатов моделирования при базовом и содержащем погрешность значениях параметра.

Влияние диффузионного числа Нуссельта

Поскольку минимальное значение этого параметра составляет 2, рассмотрено влияние его повышения на величину остаточного углерода в диапазоне изменения числа Нуссельта от 2 до 2,3. В результате установлено, что увеличение числа Нуссельта сопровождается уменьшением остаточного углерода по практически линейной зависимости (рис. 1).

При этом изменение диффузионного числа Нуссельта на 15 % приводит к изменению остаточного углерода на 11,4 %. Полученный результат является достаточно логичным, поскольку увеличение диффузионного числа Нуссельта свидетельствует об интенсификации процессов массообмена на границе поток – приведенная пленка, что в общем случае облегчает условия поступления кислорода в приведенную пленку и улучшает условия выгорания топлива.

Влияние коэффициента молекулярной диффузии

Установленное базовое значение коэффициента молекулярной диффузии получено исходя из данных работ [1,5] для типовых условий горения ПУТ в топке энергетического котла. По сравнению с базовой точкой рассмотрены еще четыре уровня D, меньше и больше базовой точки на 10 и 20 %. Результаты представлены на рис. 2.

Установлено, что при увеличении коэффициента молекулярной диффузии величина остаточного углерода понижается по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение D на величину 50 % приводит к изменению остаточного углерода на 38 %. Полученный результат соответствует логике протекания процесса, поскольку увеличение коэффициента молекулярной диффузии приводит к снижению диффузионного сопротивления приведенной пленки и имитирует облегчение условий доступа кислорода к поверхности горящего углерода.

Влияние расчетной плотности частиц

Относительно базового уровня плотности коксового остатка рассмотрены еще четыре уровня $\rho_к$ на 10 и 20 % больше и меньше базового уровня. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Как видим, увеличение задаваемого в модель значения $\rho_к$ приводит к увеличению остаточного углерода по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение величины $\rho_к$ на 50 % приводит к изменению остаточного углерода на 206,5 %. Этот расчетный результат является логичным, так как для более плотного материала. при том же количестве доставляемого к поверхности частиц кислорода и его расходовании на окисление углерода, скорость уменьшения размера частиц должна уменьшаться, а частицы являются более тяжелыми, что и определяет большее расчетное значение остаточного углерода.

Установленная закономерность указывает на важность выбора подхода к заданию плотности выгорающих частиц топлива. Обычно этому вопросу не уделяется достаточно внимания. Хотя вопрос остается открытым. В принципе возможны варианты задания в качестве $\rho_к$ следующих значений:

– истинной плотности угля;

– плотности частиц с учетом выхода летучих (в исходном массиве частиц остаются нелетучий углерод и зола);

– плотности частиц из предположения, что в их объеме частиц остается только нелетучий углерод, а вся зола выплавляется и в виде шарообразных тел, существенно меньших, чем сама частица, и стыкующихся с поверхностью частицы,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

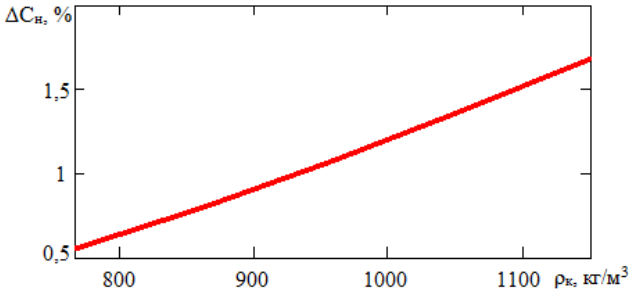


Рис. 3. Влияние плотности коксового остатка на общую величину остаточного углерода

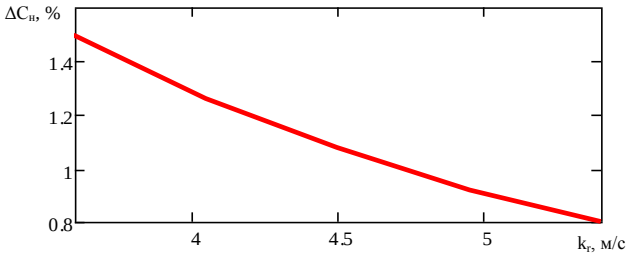


Рис. 4. Влияние константы скорости реакции окисления углерода на общую величину остаточного углерода

не препятствуя ее выгоранию [1].

Логично предположить, что на начальном этапе выгорания частицы более справедливым является второй подход, но в течение большей части процесса горения истинная плотность частиц будет ближе всего к значению, определяемому третьим способом. Для моделирования удобно пользоваться единым подходом. В данной работе выбран третий подход. Именно с его помощью было сформулировано базовое использование для исследования значения расчетной плотности частиц для используемого состава угля – 958 кг/м^3.

Влияние константы скорости реакции

В качестве базового уровня выбрано значение 4,5 м/с (по данным работы [1]). Рассмотрены еще четыре уровня k_r на 10 и 20 % больше и меньше базового уровня. Результаты представлены на рис. 4.

Как видим, увеличение задаваемого в модель значения k_r приводит к снижению остаточного углерода по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение величины k_r на 50 % приводит к изменению остаточного углерода на 87 %. Этот результат является логичным – с ростом константы скорости реакции остаточный углерод должен уменьшаться.

Значение константы скорости реакции углерода определяется при помощи следующего выражения:

$$\mathrm{k_r} = k_{r0} \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \qquad (2)$$

где k_{r0} – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации реакции, кДж/кмоль.

Исходя из характера зависимости для определения k_r видно, что проведенное исследование (диапазон изменения k_r ±20 % от базового уровня) отвечает на вопросы влияния погрешности задания k_r, полученной либо посредством неточного задания предэкспоненциального множителя, либо при крайне незначительных погрешностях задания температуры, поскольку при погрешностях задания температуры уже в несколько десятков градусов неточность определения k_r будет составлять сотни процентов и оказывать очень существенное влияние на результаты определения остаточного углерода.

Влияние температуры продуктов сгорания

Если подойти формально к исследованию этого вопроса и рассмотреть влияние температуры только лишь как термического параметра состояния в уравнениях типа (1), то будет получен следующий результат: увеличение температуры приводит к увеличению остаточного углерода. С расчетной точки зрения этот результат объясняется уменьшением действительной плотности продуктов сгорания при увеличении их температуры. Однако в целом это противоречит логике процесса – из практики известно, что увеличение температуры приводит к более качественному выгоранию топлива. Аналогичную ситуацию имеем при рассмотрении вопроса о влиянии коэффициента расхода воздуха. Если полагать, что этот параметр определяет только концентрацию кислорода в продуктах сгорания, то при исследовании параметрической чувствительности окажется, что увеличение коэффициента расхода воздуха приводит к существенному понижению остаточного углерода. С расчетной точки зрения это объясняется повышением концентрации кислорода. Однако этот результат также противоречит логике протекания процесса – из практики известно, что данная зависимость носит экстремальный характер и повышение коэффициента расхода воздуха выше некоторого рационального значения приводит к повышению остаточного углерода из-за захолаживания топки.

Поэтому, исследуя параметрическую чувствительность модели по отношению к точности задания температуры, необходимо учитывать не только ее влияние как термического параметра состояния, но и влияние на значение константы скорости реакции (зависимость (2)). Исследование проведено относительно базового уровня средней температуры продуктов сгорания в топ-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

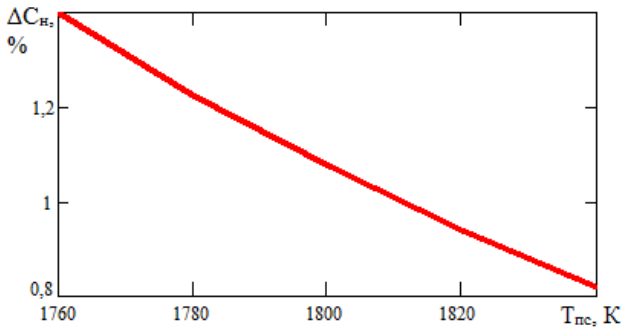


Рис. 5. Влияние средней температуры продуктов сгорания на общую величину остаточного углерода

ке котла 1800 К. Рассмотрено изменение температуры в пределах 1760-1840 К. Результаты представлены на рис. 5.

Установлено, что с увеличением температуры понижается содержание остаточного углерода. Так, изменение средней температуры в диапазоне 1760-1840 К приводит к снижению остаточного углерода на 70 %.

Важным также является вопрос, оказывает ли влияние на результаты расчетов задание средней температуры продуктов сгорания в топке вместо реального закона изменения температуры. Для решения этой задачи было проведено при прочих равных условиях два численных эксперимента: со средним значением температуры в топке 1800 К и с учетом изменения этой величины по следующему закону:

$$T = \begin{cases} 1800, \ \textit{если} \ \ \tau < 0{,}5c; \\ 2130 - (2130 - 1470) \cdot (\tau - 0{,}5) / 2{,}3, \\ \textit{если} \ \ 0{,}5 \le \tau \le 2{,}8. \end{cases}$$

При составлении этого закона изменения температуры использованы экспериментальные данные о температуре в ядре факела (при встрече факелов горелок, установленных на противоположных боковых стенах топки в ее средней части) и температуре продуктов сгорания на выходе из топки. Среднеинтегральное значение температуры продуктов сгорания по этому закону также составляет 1800 К.

В первом случае получено значение остаточного углерода 1,075 %, а во втором – 1,125 %. Таким образом, учет закона изменения температуры в топке позволил уточнить значение остаточного углерода на величину порядка 5 %.

Выводы

В результате исследования параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела установлено, что значительное влияние на результаты моделирования оказывает задание плотности коксового остатка и температуры продуктов сгорания при условии ее прямого учета на значение константы скорости реакции.

Так, в исследованных диапазонах названных величин для плотности коксового остатка остаточный углерод увеличивается на 4 %, а для температуры продуктов сгорания уменьшается на 17 % на каждый процент роста значений этих величин. Также установлено, что учет реального закона изменения температуры в топке позволяет уточнить результаты на величину порядка 5 %.

Для остальных исследованных параметров (диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии и константа скорости реакции при ее прямом задании) установлено, что погрешность определения остаточного углерода составляет порядка 1-2 % на каждый процент неточности задания названных параметров.

Полученные результаты важны для адаптации рассматриваемой модели к условиям конкретных энергетических котлов и ее дальнейшего эффективного использования, поскольку позволяют выделить параметры, к заданию которых необходимо относиться наиболее тщательно, и создают предпосылки для формирования обоснованной оценки точности получаемых результатов моделирования.

Список литературы

1. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
2. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учеб. пособ. для вузов / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан; ГВУЗ «ДонНТУ». – Донецк: Изд-во «Ноулидж». Донецкое отд-ние, 2014. – 232 с.
3. Ranade, V. V. Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers / V. V. Ranade, D. F. Gupta. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 271 p.
4. Díez, L. I. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques / L. I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering.– Vol. 25. Iss. 10. – 2005. – P. 1516-1533.
5. Бирюков, А.Б. Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Вестник ДонНТУ.– 2017.– №1.– С. 32-37.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

6. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Т.13. – Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.

7. Churchill, Stuart W. The accuracy and parametric sensitivity of algebraic models for turbulent flow and convection / Stuart W. Churchill, Bo Yu, Yasuo Kawaguchi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 48. Iss. 25-26. – 2005. – P. 5488 -5503.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, V.A. Semergey
Donetsk National Technical University (Donetsk)

STUDYING THE PARAMETRIC SENSITIVITY OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR POLYFRACTIONAL TORCH BURNOUT

Background. *The well-known mathematical model for studying of combustion technology of pulverized coal in furnaces of power boilers is represented by several ordinary differential equations of the 1st order, describing the change in the characteristic dimensions of the particles for each of the factions. To adapt this model to the conditions of specific power boilers and its further effective usage it is necessary to study its parametric sensitivity, which determined the objective of this paper.*
Materials and/or methods. *The analysis of parametric sensitivity of the model is carried out with respect to the exact specifications of the following parameters: diffusion Nusselt number, Nu_D, the molecular diffusion coefficient, D, the estimated density of particles, $\rho_к$, the rate constant of the reaction, k_r, the temperature of combustion products, T. The basic values of the parameters were chosen as 2; 4.15•10-4 m^2/s; 958 kg/m^3; 4.5 m/s; 1800K. The essence of the study is to simulate the error in setting each parameter individually and comparing the modeling results obtained with basic and inexact parameter values.*
Results. *The ranges of 2-2.3 and $3.32 \cdot 10^4$–$4.98 \cdot 10^4$ m^2/are studied for Nu_D and D respectively. In both cases, the increase in these variables leads to a reduction of residual carbon in almost linear dependency. For every percent of their change the result changes by less than one percent. For $\rho_к$ the range of 766-1150 kg/m^3 studied. The increase of $\rho_к$ leads to an increase in residual carbon of about 4 % for every one percent change of $\rho_к$. For k_r the range of 4.6-5.4 m/s studied. The increase in this value leads to a decrease in residual carbon of about 1.6 % for each percent change of k_r. For T the range of 1760-1840 K studied. The increase in this value leads to a decrease in the content of remaining carbon of about 17 % for each percent change of T. It is also shown that the consideration of the real principle of temperature change in the furnace allows specifying the results to 5 %.*
Conclusion. *The results of the simulation are greatly influenced by a precise specification of the temperature of combustion products and density of the coke residue*. The inaccuracy of specifying the diffusion Nusselt number, the molecular diffusion coefficient and the rate constant of the reaction (directly specified) *leads to errors in determining the residual carbon about 1-2 % for each percent of the inaccurate specifying of parameters.*

Keywords: *coal dust, power boiler, diffusion Nusselt number, molecular diffusion coefficient, the rate constant of the reaction, the temperature of combustion products.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков
РИНЦ SPIN-код: 3186-0680
SCOPUS ID: 7006918782
ORCID ID: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

В.А. Семергей
Телефон: +380 (66) 189-60-57
Эл. почта: semergey79@mail.ru

Статья поступила 05.07.2017 г.
© А.Б. Бирюков, В.А. Семергей, 2017
Рецензент д.х.н., проф. В.В. Шаповалов

УДК 541.183:622.333

С.Л. Хилько /к.х.н./, Е.В. Щербакова
Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко (Донецк)

ВЛИЯНИЕ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Влияние алифатических спиртов C_4–C_5 на реологические характеристики водоугольных суспензий изучено с целью обоснования возможности утилизации отходов производства спирта в составе жидкой фазы топливных суспензий. Показано, что добавки спиртов изменяют характер течения водоугольных суспензий и резко увеличивают значения эффективной вязкости. Добавки поверхностно-активных веществ на основе сульфогуматов натрия существенно снижают значения эффективной вязкости и оказывают влияние на характер течения водоугольных суспензий.

Ключевые слова: *алифатические спирты C_4-C_5, водоугольные суспензии, сульфогумат натрия, характер течения, реологические характеристики, вискозиметрия.*

Постановка проблемы

Использование или утилизация вторичных продуктов различных производств является важной проблемой. При производстве этилового спирта образуется большое количество отходов и побочных продуктов, таких как сивушные масла, спиртовая барда. Сивушные масла как побочный продукт спиртового брожения содержат в своем составе большое количество алифатических спиртов, главным образом изоамиловый, бутиловый и изобутиловый [1].

Известны различные способы утилизации сивушных масел. Это методы ректификации с целью получения из них высших спиртов, главным образом спиртов с содержанием атомов углерода C_5 и выше [2,3]. Известны методы утилизации сивушных масел путем сжигания их в топках в смесях с мазутами [1,2], методы получения смесевых растворителей на основе сивушных масел [4], а также использование сивушных масел в качестве сырья для получения альтернативного биодизельного топлива [5].

Одним из путей рационального использования имеющихся энергоносителей является внедрение ресурсосберегающих технологий получения коллоидных топлив – суспензий, эмульсий и трехфазных систем. Коллоидные топлива представляют собой жидкие композиционные системы на основе суспензий, эмульсий, а также более сложные системы – суспензии с эмульсионной жидкой фазой. Важным преимуществом коллоидных топлив является возможность рационального использования отходов промышленности для приготовления жидких калорийных топлив, пригодных для сжигания в котлоагрегатах. Кроме этого, коллоидные композиции по сравнению со стандартными видами топлив являются экологически чистыми в силу специфики их горения, что позволяет экологически безопасно утилизировать отходы производства. Обязательным компонентом коллоидных топлив являются поверхностно-активные вещества (ПАВ) – это химические добавки – регуляторы физико-химических свойств суспензий, прежде всего вязкостных, прочностных характеристик и устойчивости.

Одним из возможных путей утилизации сивушных масел и других отходов производства спирта может быть приготовление водоугольных суспензий с добавками этих отходов в состав жидкой фазы.

Анализ последних исследований и публикаций

Топливные суспензии представляют собой коагуляционные структуры, т.е. пространственные сетки из угольных частиц в жидкости. Пространственные структуры характеризуются структурно-механическими (реологическими) свойствами. Наиболее важными из них являются вязкость, текучесть, упругость, пластичность, прочность. Требования технологии к коллоидным топливам сводятся к получению седиментационно- и агрегативно-устойчивых в течение 15-30 суток высококонцентрированных систем с приемлемыми реологическими параметрами – низким уровнем вязкости ($\eta_{ЭФ}$=2,0-10,0 Па×с при скорости сдвига $\dot{\varepsilon}$=9 $с^{-1}$) и начального напряжения сдвига (R=5,0-10,0 Па). Одним из важных показателей качества коллоидных топлив, пригодных для транспортирования и хранения, является их характер течения, то есть общий вид зависимости изменения напряжения сдвига (R, Па) от скорости сдвига (деформации)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

($\acute{\varepsilon}$, c^{-1}) – $R=f(\acute{\varepsilon})$ [6-8].

Одним из видов суспензионного топлива являются суспензии тонкоизмельченного угля и спиртов или водных растворов спиртов. Использование в качестве топлива суспензий со сложным составом жидкой фазы позволит утилизировать различные отходы химической промышленности [8,9]. Кроме того, водные суспензии угля со спиртами – это более калорийное топливо [10-12]. Проведенные исследования по сжиганию спиртоугольных и спиртоводоугольных суспензий показали, что эти топлива, в отличие от водоугольных суспензий, увеличивают стабильность пламени, повышают степень конверсии углерода, снижают тепловые потери на испарение влаги. В результате КПД котла увеличивается в среднем с 75 до 82 %, а степень конверсии углерода – с 95 до 98 % [13,14].

Влияние низших спиртов (C_1-C_3) на реологические характеристики водоугольных суспензий описано в литературе [7,15,16]. Детальных исследований влияния алифатических спиртов с числом атомов углерода ≥4 на реологические характеристики водоугольных суспензий в литературе не обнаружено.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование влияния алифатических спиртов (бутилового, изобутилового и изоамилового) на реологические характеристики водоугольных суспензий.

Основной материал исследования

Водоугольные суспензии готовили в сосуде с механической лопастной мешалкой (IR-25) с фиксируемым и постоянным для всех получаемых образцов числом оборотов ω=1500 об/мин. Для приготовления суспензий использовали уголь марки ДГ Донецкого бассейна (зольность, A=13,3 %), размер частиц угля составлял ≤ 100 мкм. Сначала получали эмульсию из алифатических спиртов и воды с добавками или без добавок стабилизатора эмульсий – сульфогумата натрия (СГН). Эмульсию добавляли к высокодисперсному порошку угля и гомогенизировали систему при перемешивании лопастной мешалкой в течение 10 мин. Концентрация твердой фазы составляла 50 мас. %. Концентрацию алифатических спиртов в составе водоугольной суспензии варьировали. Концентрация сульфогумата натрия составляла 0,25 % в составе суспензии.

Реологические характеристики суспензий измеряли на ротационном вискозиметре RHEOTEST-2 VEB MLW с использованием системы коаксиальных гладких цилиндров (S 2). Радиальный зазор между наружным и внутренним цилиндрами составлял 1,13 мм, а соотношение радиусов цилиндров S =1,06. Температура измерения реологических параметров составляла 15 (±0,1) ^oC. Получали зависимости изменения напряжения сдвига (R, Па) от скорости деформации ($\acute{\varepsilon}$, c^{-1}) и эффективной вязкости ($\eta_{эф}$, Па×с) от напряжения сдвига. При этом контролировали значения основных реологических (вязкостных) параметров, а именно: η_{max} – эффективной вязкости при $\acute{\varepsilon}$=1,8 c^{-1}, η_{min} – эффективной вязкости при $\acute{\varepsilon}$=437,4 c^{-1} и $\eta_{эф}$ – эффективной вязкости при $\acute{\varepsilon}$=9,0 c^{-1}. Тип течения суспензии определяли при аппроксимации реологических кривых течения реологическими уравнениями вязкопластичной и псевдопластичной жидкостей.

Алифатические спирты с количеством атомов углерода в цепи более 4-х ограниченно растворимы в воде. Поэтому для приготовления угольных суспензий с жидкой фазой, содержащей такие спирты, можно применить способ приготовления суспензий с эмульсионной жидкой фазой [9 и цит. там лит.].

На рис. 1 приведены зависимости изменения скорости сдвига и эффективной вязкости водоугольных суспензий без добавок от напряжения сдвига (реологические кривые), которые с высокими значениями коэффициентов корреляции подчиняются степенным уравнениям вида $(\acute{\varepsilon}, \eta)=a\times R^n$. Такой характер течения относится к классическому стационарному псевдопластичному типу – это течение с однозначными зависимостями $\acute{\varepsilon}=f(R)$ и $\eta=f(R)$, когда постепенное увеличение скорости деформации приводит к монотонному увеличению напряжения сдвига и монотонному снижению эффективной вязкости.

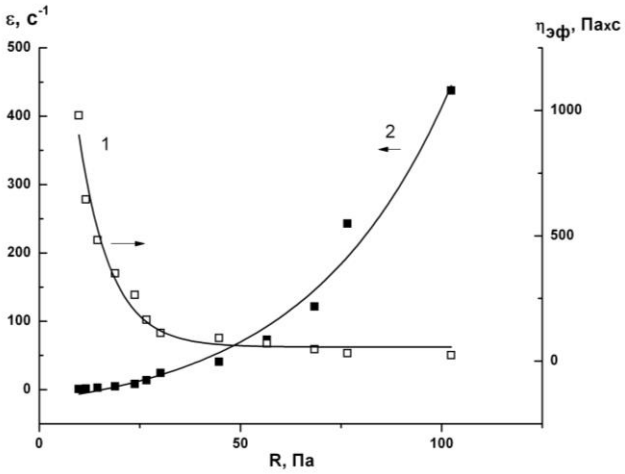


Рис. 1. Реологические кривые течения водоугольных суспензий из угля марки ДГ с концентрацией твердой фазы 50 мас. %

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

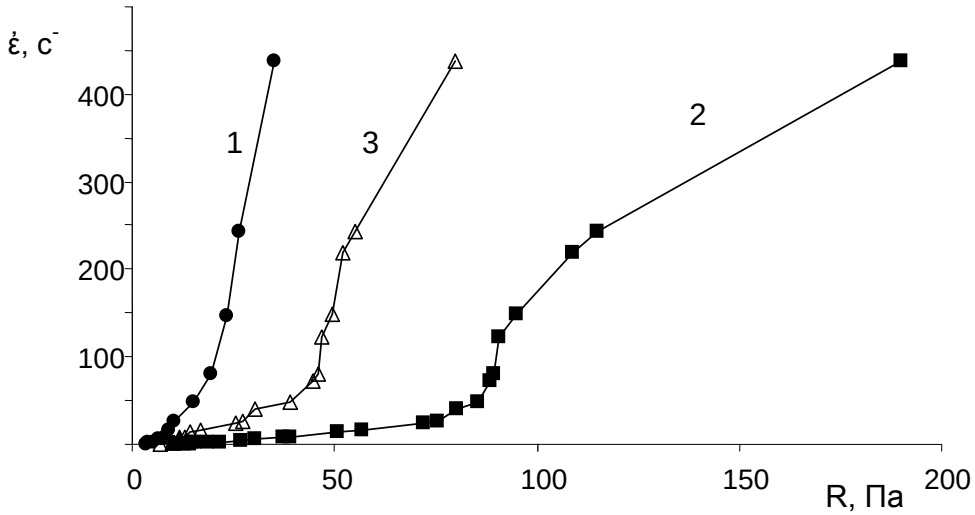


Рис. 2. Реологические кривые течения водоугольных суспензий из угля марки ДГ (*1*), с добавками 6,0 % бутилового спирта (*2*) в составе суспензии и 6,0 % бутилового спирта с 0,25 % сульфогумата натрия (*3*)

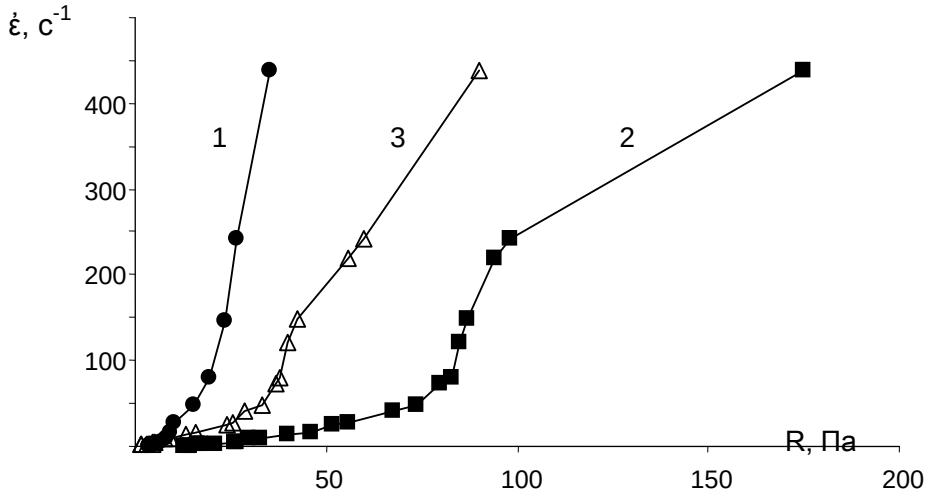


Рис. 3. Реологические кривые течения водоугольных суспензий из угля марки ДГ (*1*), с добавками 6,0 % изобутилового спирта (*2*) и 6,0 % изобутилового спирта с 0,25 % сульфогумата натрия (*3*)

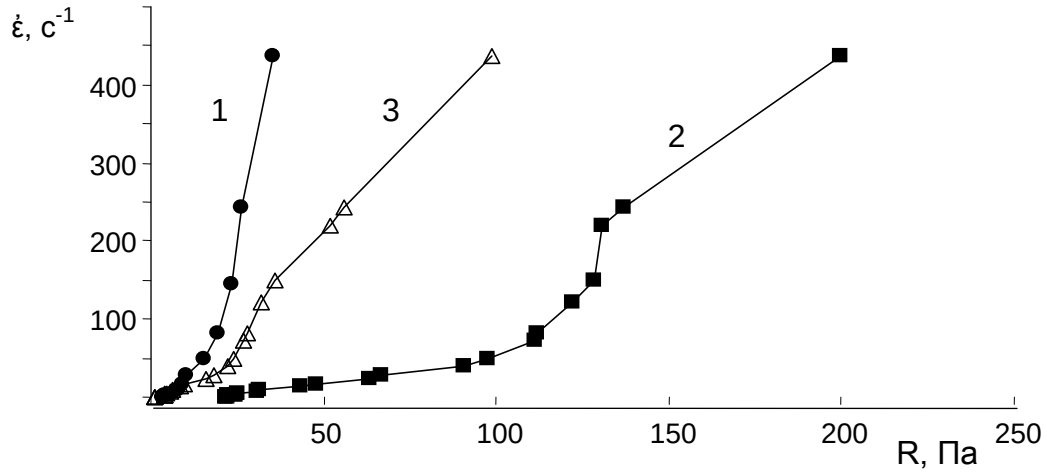


Рис. 4. Реологические кривые течения водоугольных суспензий из угля марки ДГ (*1*), с добавками 6,0 % изоамилового спирта (*2*) и 6,0 % изоамилового спирта с 0,25 % сульфогумата натрия (*3*)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

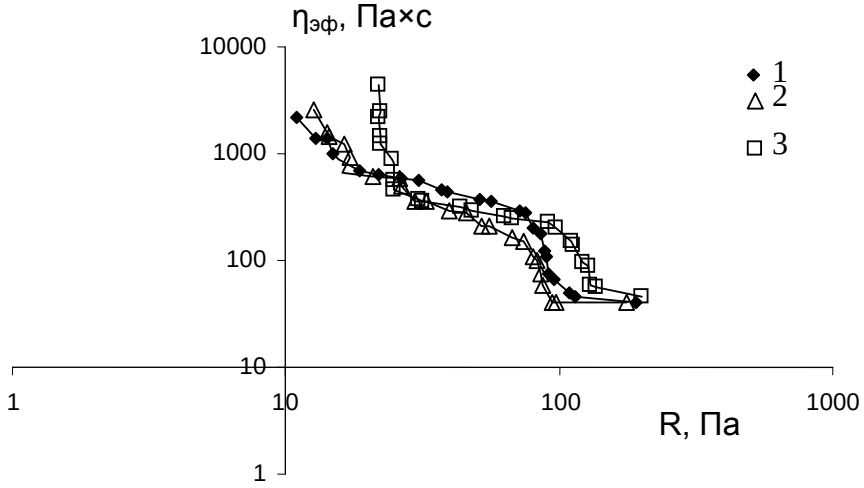


Рис. 5. Изменение эффективной вязкости (η) от напряжения сдвига (*R*) водоугольных суспензий с добавками 6,0 % спиртов: бутилового (*1*), изобутилового (*2*) и изоамилового (*3*)

В работе использовали в качестве регулятора реологических свойств водоугольных суспензий сульфогуматы натрия, которые описаны в литературе как эффективные поверхностно-активные вещества для таких дисперсных систем [20-22]. Как следует из таблицы, результатом их действия в суспензиях является существенное снижение значений эффективной вязкости и положительное влияние на характер течения (рис. 2-4, кривые 3) – области предельной степени аномалии вязкости уменьшаются.

Выводы

Изучено влияние алифатических спиртов C_4-C_5 на реологические характеристики водоугольных суспензий. Показана возможность использования отходов производства спирта, содержащих в своем составе алифатические спирты с числом атомов углерода C_4-C_5 (бутиловый, изобутиловый, изоамиловый) в составе жидкой фазы водоугольных суспензий с применением регуляторов реологических свойств.

Установлено, что применение в качестве регуляторов добавок сульфогуматов натрия позволяет получать технологически приемлемые значения реологических параметров топливных суспензий с добавками алифатических спиртов C_4–C_5 и влиять на их характер течения.

Табл. 1. Реологические характеристики водоугольных суспензий с добавками алифатических спиртов

Спирт (СП)	η_{max}, Па×с при $\dot{\varepsilon}$=1,8 $с^{-1}$	η_{min}, Па×с при $\dot{\varepsilon}$=437,4 $с^{-1}$	$\eta_{эф}$, Па×с при $\dot{\varepsilon}$=9,0 $с^{-1}$
-	4,0	35,3	8,2
Бутиловый	15,7	190,0	39,2
СП + СГН	10,0	125,0	10,8
Изобутиловый	17,2	175,0	32,5
СП + СГН	7,8	102,5	10,8
Изоамиловый	22,5	204,0	31,6
СП + СГН	8,6	99,2	9,4

Список литературы

1. Климовский, Д.Н. Технология спирта / Д.Н. Климовский, В.Н. Стабников. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 452 с.
2. Пат. РФ 09.11.2004 C07C29/80, C07C31/08. Способ переработки отходов спиртового производства (варианты) / Бжицкий В.А., Мисюков Н.В., Жуков Ю.Н.; «Нитрометан». – № 2272018; заявл. 09.11.2004; опубл. 20.03.2006.
3. Пат. РФ 21.05.2001 C07C29/00, C07C31/00. Способ получения изоамилового спирта (варианты) / Мисюков Н.В. [и др.]; «Нитрометан». – № 2109724; заявд. 21.05.2001; опубл. 20.06.2010.
4. Пат. РФ C07C69/12, C07C31/08, C07C67/03. Смесевой растворитель на основе сивушного масла / Гревцев А.Ф. [и др.]; Воронежская государственная технологическая академия. –№ 2174974; заявл. 28.03.2000; опубл. 20.10.2001.
5. Василов, Р.Г. Биотопливо: биодизель, биоэтанол, биогаз / Р.Г. Василов // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. – 2007. – № 1. Т. 3. – С. 1-61.
6. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1988. – 256 с.
7. Урьев, Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 319 с.
8. Хилько, С.Л. Топливные угольные суспензии (Обзор) / С.Л. Хилько, Е.В. Титов // Химия и технология топлив и масел. – 2008. – № 1. – С. 52-58.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

9. Хилько, С.Л. Физико-химические аспекты приготовления трехфазных коллоидных топлив (Обзор) / С.Л. Хилько, Е.В. Титов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 1. – С. 52-58.
10. Kazuhiko, H. Development of technology of preparation of coal-methanol slurry / H. Kazuhiko // J. Fuel Soc. Jap. – 1990. – No. 9. Vol. 69. – P. 848-856.
11. Bayer, A. Pipeline transport of fossil raw-materials with methanol / A. Bayer, K. Gruber, K. Hentschel, W. Keim // Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochem. – 1982. – No. 10. Vol. 35. – P. 474-484.
12. Ekmann, A. C. Viscosities of coal-water-methanol mixtures / A. C. Ekmann // Fuel. – 1984. – No. 8. Vol. 3. – P. 1182-1184.
13. Головин, Г.С. Спиртоводоугольные суспензии – новый вид транспортабельного экологически чистого топлива / Г.С. Головин, Е.Г. Горлов, А.Л. Лапидус // Рос. хим. журн. – 1994. – № 5. Т. 38. – С.66-69.
14. Takeshi, S. Single droplet combustion of coal-methanol slurry / S. Takeshi, S. Masayoshi, S. Masahiro // Fuel. – 1985. – No. 2. Vol. 64. – P. 163-168.
15. Хилько, С.Л. Влияние добавок низших спиртов на свойства солей гуминовых кислот в топливных дисперсных системах / С.Л. Хилько, Е.В. Титов // Химия тверд. топлива. – 2010. – № 2. – С. 31-40.
16. Басенкова, В.Л. О влиянии метанола на свойства угля и его суспензий / В.Л. Басенкова, А.Л. Антонова, А.В. Бутюгин // Химия тверд. топлива. – 1988. – № 2. – С. 128-132.
17. Белкин, И.М. Ротационные приборы**.** Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
18. Хилько, С.Л. Особенности течения водных суспензий палыгорскитовой и бентонитовой глин / С.Л. Хилько, Е.В. Титов // Коллоид. журн. – 2002. – № 5. Т. 64. – С. 697-703.
19. О возможности применения двух моделей эффекта сверханомалии вязкости для анализа кривых течения структурированных дисперсных систем / С.Л. Хилько [и др.] // Коллоид. журн. – 2006. – № 1. Т. 68.– С. 114-122.
20. Пат. Украины С 10 L 1/32. Попов А.Ф., Титов Е.В., Хилько С.Л. [и др.] – № 5583; опубл. 15.03.2005.
21. Хилько, С.Л., Титов Е.В. Пластифицирование водоугольных суспензий солями гуминовых кислот // Коллоидный журнал. – 1995. – № 6. Т. 57.– С. 873-877.
22. Хилько, С.Л. Влияние электролитов и неэлектролитов на адсорбционные и поверхностные реологические характеристики растворов солей гуминовых кислот / С.Л. Хилько, А. И. Ковтун, В.Б. Файнерман // Коллоид. журн. – 2011. – № 3. Т. 71. – С. 97-104.

S.L. Khil'ko /Cand.Sci. (Chem.), E.V. Shcherbakova
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)

THE INFLUENCE OF ALIPHATIC ALCOHOLS ON RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COAL-WATER SLURRY

Background. *In the production of ethyl alcohol, the fusel oil is formed as a by-product of alcoholic fermentation. The composition of fusel oil includes a large number of aliphatic alcohols, mainly amyl, isoamyl, butyl, and isobutyl. In the paper, one of the possible ways of utilization of fusel oils containing aliphatic alcohols C_4-C_5, in the composition of coal-water slurry with additives of these alcohols in the liquid phase composition is proposed and justified.*

Materials and/or methods. *The DG-grade coal of the Donetsk basin (ash content A=13.3 %, the size of coal particles ≤ 100 microns), was used for the preparation of the slurry. The rheological characteristics of the slurry were measured on the rotational viscosimeter RHEOTEST-2 VEB MLW using the system of smooth coaxial cylinders (S 2). The radial clearance between the outer and inner cylinders was 1.13 mm, and the radii ratio of the cylinders S=1.06. The measurement temperature of the rheological parameters was 15 (± 0.1) ^oC. The dependencies of shear stress change (R, Pa) on strain rate (ἑ, s^{-1}) and of effective viscosity (η, Pa×s) on shear stress were received. Along with this, the values of basic rheological parameters were controlled, namely η_{max} – efficient viscosity at ἑ=1.8 s^{-1}, η_{min} – effective viscosity at ἑ=437 s^{-1} and η_{ef} – efficient viscosity at ἑ=9.0 s^{-1}.*

Results. *Shown, that the addition of alcohol changes the nature of the flow of coal-water slurry. The appearance of vertical sections on the rheological curves of the flow (R=f(ἑ)) in some area of the rate shear and horizontal areas in the variations dependencies of effective viscosity on shear stress (η_{ef}=f(R)) indicates the emergence of limited degree of anomaly of viscosity, or "pre-breaking" condi-*

tion. The use of surfactants on the basis of sodium sulfa-humates as a regulator of rheological characteristics can significantly reduce the value of the effective viscosity and influence the nature of the flow of coal-water slurry in such a way that the areas of the limited degree of the anomaly of viscosity are decreased.

Conclusion. *Shown the possibility of using production waste of the alcohol containing aliphatic alcohols with carbon numbers C_4-C_5 (butyl, isobutyl, isoamyl) in the composition of the liquid phase of the coal-water slurry. Ascertained, that the use of additives of sodium sulfa-humate allows obtaining technically acceptable values of the rheological parameters of the fuel slurry with additives of aliphatic alcohols C_4- C_5 and influencing the nature of their flow.*

Keywords: *aliphatic alcohols C_4-C_5, coal-water slurry, sodium sulfa-humate, nature of the flow, rheological characteristics, viscosimetry.*

Сведения об авторах

С.Л. Хилько
Телефон: +380 (66) 757 94-62
Эл. почта: sv-hilko@yandex.ru

Е.В. Щербакова
Телефон: +380 (50) 278-90-56
Эл. почта: sv-hilko@yandex.ru

Статья поступила 27.12.2016 г.
© С.Л. Хилько, Е.В. Щербакова, 2017
Рецензент д.х.н., проф. Ю.Б. Высоцкий



ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **5…8 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы и сведения об авторах статьи;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты.

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефону **+380 (66) 176-72-65** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org