



ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

ВЕСТНИК

2024
Том 30
№ 2

**ТАМБОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

**Transactions of the Tambov
State Technical University**

<http://vestnik.tstu.ru>



Россия Тамбов
Издательство ТГТУ

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

**ВЕСТНИК
Тамбовского
государственного
технического
университета**

***TRANSACTIONS
of the Tambov
State
Technical
University***

2024. Том 30. № 2.

**Четырехязычный
научно-теоретический
и прикладной журнал
широкого профиля**

***Four-Language
Scientific-Theoretical and
Applied Multidisciplinary
Journal***

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

**Россия Тамбов
Издательство ТГТУ**

Совет редакторов

Алымов Михаил Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН

Абоносимов Олег Аркадьевич, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Абрамов Геннадий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Бузник Вячеслав Михайлович, д-р хим. наук, профессор, акад. РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва

Гатапова Наталья Цибиковна, д-р техн. наук, профессор, **главный редактор**, ФГБОУ ВО «ТГТУ», +7 4752 63 72 39; эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

Дворецкий Станислав Иванович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Дивин Александр Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Дмитриевский Борис Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Ивлиев Андрей Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Илясов Леонид Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Квятковская Ирина Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»

Князева Лариса Геннадьевна, д-р хим. наук, доцент, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Тамбов

Краснянский Михаил Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Куликов Геннадий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Лазарев Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Литовка Юрий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Матвейкин Валерий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Мищенко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Муджумдар Арун С., PhD, профессор, Университет Мак-Гилл, Монреаль, Канада

Муромцев Дмитрий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Перре Патрик, PhD, профессор, Национальная школа инженерии сельского хозяйства, вод и лесов, Нанси, Франция

Пономарев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Сафаров Джавид, Dg.-Ing, Ростокский университет, Германия

Столин Александр Моисеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН, Черноголовка

Тихомиров Сергей Германович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Тсотсас Евангелос, PhD, профессор, Университет Отто-фон-Герике, Магдебург, Германия

Цыганкова Людмила Евгеньевна, д-р хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»

Адрес редакции: 392000, Тамбовская область, г.о. город Тамбов, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещ. 2.

Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».

Эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

Редакторы иностранных текстов: Н. А. Гунина, В. С. Григорьева, Н. Ю. Бородулина.

Редакторы: И. М. Курносова, О. В. Мочалина.

Компьютерная верстка: О. В. Мочалина, И. М. Курносова

Подписано в печать 10.06.2024. Дата выхода в свет 02.07.2024.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,70; уч.-изд. л. 17,90. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 014.

Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835

e-ISSN 2542-1409

Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024

© Коллектив авторов, 2024

EDITORIAL BOARD

Mikhail Alymov, Dr. Tech. Sci., Prof., Corresponding Member RAS, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS

Oleg Abonosimov, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Tambov State Technical University

Gennady Abramov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University

Vyacheslav Buznik, Dr. Chem. Sci., Prof., Academician RAS, Baykov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, Moscow

Nataliya Gatapova, Dr. Tech. Sci., Prof., **Editor-in-Chief**, Tambov State Technical University, +7 4752 63 72 39; e-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Stanislav Dvoretzky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Aleksander Divin, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Boris Dmitrievsky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Andrey Ivliev, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Russian State Professional Pedagogical University, Yekaterinburg

Leonid Ilyasov, Dr. Tech. Sci., Prof., Tver State Technical University

Irina Kvyatkovskaya, Dr. Tech. Sci., Prof., Astrakhan State Technical University

Larisa Knyazeva, Dr. Chem. Sci., Associate Professor, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov

Mikhail Krasnyanskiy, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Gennady Kulikov, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Sergey Lazarev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Yuri Litovka, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Valery Matveykin, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Sergey Mishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Mujumdar Arun S., PhD, McGill University Montreal, Canada

Dmitry Muromtsev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Perré Patrick, PhD, National School of Rural Engineering, Water and Forests, Nancy, France

Sergey Ponomarev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Javid Safarov, Dr.-Ing., University of Rostock, Germany

Aleksander Stolin, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS, Chernogolovka

Sergey Tikhomirov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University of Engineering Technologies

Evangelos Tsotsas, PhD, Otto-von-Guericke University, Magdeburg, Germany

Lyudmila Tsygankova, Dr. Chem. Sci., Prof., Derzhavin Tambov State University

Editorial office address: Bld 2, 106/5, Sovetskaya St., Tambov, Tambov region, 392000, Tambov State Technical University. E-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Адрес издателя: 392000, Тамбовская область, г.о. город Тамбов, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещ. 2. E-mail: tstu@admin.tstu.ru

СМИ журнал «Вестник Тамбовского государственного технического университета» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Регистрационный номер СМИ ПИ № ФС77-80501 от 01 марта 2021 г.

Журнал «Вестник Тамбовского государственного технического университета» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК и международную реферативную базу Chemical Abstracts

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика.	
Управление. Приборы	184
Дворецкий С. И., Дворецкий Д. С., Акулинин Е. И. Постановки задач оптимизации при интегрированном проектировании технологических процессов, аппаратов и систем управления в условиях неопределенности.....	184
Фролов С. С., Худорожков О. В., Лукьянчиков А. А., Павлов П. А. Воспроизведение фрагмента сигнала с прямоугольным линейчатым спектром системы измерения частотных характеристик фильтров нижних частот	196
Чернухин А. В., Савицкая Т. В., Сверчков А. М., Дементенко А. В. Разработка программного приложения для моделирования эвакуации при пожаре на опасном производственном объекте.....	209
Хвостов А. А., Слюсарев М. И., Журавлев А. А., Битюков В. К., Хаустов И. А., Романов Р. А. Оценка температурной погрешности при проектировании систем управления обогревом теплиц элементами с открытой спиралью	219
Шевнина Ю. С. Управление системой контроля поверхностных дефектов изделий микроэлектроники	234
Пономарев С. В., Баранов С. С. Алгоритм обработки большого числа экспериментальных данных при измерении теплофизических свойств материалов методом плоского импульсного источника теплоты	246
Смирнова Ю. А., Марьенков А. Н., Тарабановская Е. С. Использование базы знаний при построении цифрового двойника процесса взаимодействия молекулярных систем	256
Головко Ю. А., Головко С. В. Автоматизированный комплекс мониторинга и управления уровнем воды и кислорода в рыбопродуктивных прудовых хозяйствах	267
Сустин А. И., Пудовкин А. П., Панасюк Ю. Н. Информационно-измерительная и управляющая система с дальномерным каналом третичной обработки радиолокационной информации повышенной точности	274
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	285
Смирнов П. М., Черпицкий С. Н., Таршис М. Ю., Королев Л. В., Капанова А. Б. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в устройстве барабанного типа с дополнительными рабочими элементами	285
Пахомов А. Н., Пекшев Д. С., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В. Оценка эффективности механических методов разрушения пен	292
Борщев В. Я., Сухорукова Т. А., Фарур Х., Макаров В. С. Исследование взаимодействия частиц сыпучих материалов в каскадном гравитационном смесителе	300
Шубин И. Н., Попова А. А. Структурно-иерархическая схема процесса высокотемпературной активации углеродного материала	308
Котенев С. И. Кинетические характеристики электромикрофильтрационной очистки технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ	317
Промтов М. А., Желудков В. Г., Гатапова Н. Ц., Степанов А. Ю. Характеристики водомазутной эмульсии, полученной в роторном импульсном аппарате	328
Машиностроение. Металлообработка	
Карьев Л. Г., Федоров В. А. Деформация упругого стержня в условиях внезапно приложенной к нему продольной силы.....	339
Проценко А. М. Интенсификация процессов гомогенизации смесей в рециркуляционном смесителе	346

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	184
Dvoretzky S. I., Dvoretzky D. S., Akulinin E. I. Setting Optimization Problems in the Integrated Design of Technological Processes, Devices and Control Systems in Conditions of Uncertainty.....	184
Frolov S. S., Khudorozhkov O. V., Lukyanchikov A. A., Pavlov P. A. Reproduction of a Signal Fragment with a Rectangular Line Spectrum of a Measuring System for Frequency Characteristics of Low-Pass Filters	196
Chernukhin A. V., Savitskaya T. V., Sverchkov A. M., Dementienko A. V. The Development of a Software Application for Simulation of Fire Evacuation at a Hazardous Production Facility	209
Khvostov A. A., Slyusarev M. I., Zhuravlev A. A., Bityukov V. K., Khaustov I. A., Romanov R. A. Temperature Error Estimation when Designing Greenhouse Heating Control Systems with Open Spiral.....	219
Shevnina Yu. S. Managing the Control System for Surface Defects of Microelectronics Products.....	234
Ponomarev S. V., Baranov S. S. An Algorithm for Processing a Large Number of Experimental Data while Measuring Thermal Physical Properties of Materials by the Flat Pulse Heat Source Method.....	246
Smirnova Yu. A., Maryenkov A. N., Tarabanovskaya E. S. Using a Knowledge Base to Build a Digital Twin of the Process of Interaction between Molecular Systems.....	256
Golovko Yu. A., Golovko S. V. Automated Complex for Monitoring and Controlling Water and Oxygen Levels in Fish Pond Farms.....	267
Sustin A. I., Pudovkin A. P., Panasyuk Yu. N. The Information-Measuring and Control System with a Rangefinder Channel for Tertiary Processing of Radar Information of Increased Accuracy.....	274
Chemical Engineering and Related Industries.	
Chemistry	285
Smirnov P. M., Cherpitskiy S. N., Tarhis M. Yu., Korolev L. V., Kapranova A. B. Investigation of the Bulk Materials Mixing Process in a Drum-Type Device with Additional Working Elements.....	285
Pakhomov A. N., Pekshev D. S., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V. Assessment of the Effectiveness of Mechanical Methods for Foam Destruction.....	292
Borshchev V. Ya., Sukhorukova T. A., Faarour H., Makarov V. S. A Study of the Interaction of Bulk Material Particles in a Cascade Gravitational Mixer.....	300
Shubin I. N., Popova A. A. The Structural-Hierarchical Scheme of the Process of High-Temperature Activation of Carbon Material.....	308
Kotenev S. I. Kinetic Characteristics of Electromicrofiltration Purification of Technological Solutions from Synthetic Surfactants.....	317
Promptov M. A., Zheludkov V. G., Gatapova N. Ts., Stepanov A. Yu. Characteristics of a Water Oil Emulsion Obtained in a Rotor-Stator Device.....	328
Mechanical Engineering. Metal Treatment	339
Karyev L. G., Fedorov V. A. Deformation of an Elastic Rod under Conditions of a Sudden Longitudinal Force Application.....	339
Protsenko A. M. Intensification of Homogenization Processes of Mixtures in the Recirculator Mixer.....	346

УДК 544.723.23, 519.633.2
DOI: 10.17277/vestnik.2024.02.pp.184-195

ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, АППАРАТОВ И СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

С. И. Дворецкий, Д. С. Дворецкий, Е. И. Акулинин✉

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
bio-topt@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: гибкие технологические системы; интегрированное проектирование; конструктивные параметры; критерий оптимальности; методология; неопределенность в исходной информации; одно- и двухэтапные задачи оптимизации; оптимальные задания регуляторам; режимные переменные состояния; система автоматического управления; функции-ограничения.

Аннотация: Предпринята попытка разработки методологии интегрированного проектирования работоспособных (гибких) технологических процессов, аппаратов и систем (био- и химико-технологических) и формализации возможных подходов к решению задач оптимизации конструктивных параметров и режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам системы автоматического управления) на отдельных стадиях многоэтапной итерационной процедуры решения задачи интегрированного проектирования технологических систем в условиях неопределенности. Постановки одно- и двухэтапных задач оптимизации при интегрированном проектировании учитывают наличие интервальной неопределенности факторов, что при условии их решения позволяет надеяться на достижение безопасного и оптимального (в смысле минимума приведенных затрат, себестоимости выпускаемой продукции и других показателей эффективности производства) функционирования технологических процессов, аппаратов и систем независимо от наличия неопределенных факторов в исходной информации.

Обозначения

A – множество типов аппаратурно-технологического оформления стадий производства, шт.;	$M[\cdot]$ – математическое ожидание величины $[\cdot]$;
B – множество классов систем автоматического управления, шт.;	$P_{\text{дов}}$ – заданное (доверительное) значение вероятности выполнения ограничения;
D – множество конструктивных параметров технологической системы;	$P_{\text{г}}$ – вероятность выполнения ограничения $\{\cdot\}$;
H – множество структур системы автоматической стабилизации режимных переменных технологической системы;	R – множество альтернативных технологий (методов) производства, шт.;
I – множество индексов аппроксимационных точек;	S – множество настроечных параметров системы автоматической стабилизации (САС);
J – множество индексов функций-ограничений;	U – множество режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам САС) состояния системы;

Y – множество выходных переменных состояния системы;	y – вектор выходных переменных состояния технологической системы;
a – тип аппаратурно-технологического оформления стадии производства, ед.;	α – верхняя граница целевой функции (критерия оптимальности);
b – класс систем автоматического управления;	v – номер итерации;
d – вектор конструктивных параметров технологической системы;	Ξ – множество неопределенных параметров;
$g(\cdot)$ – вектор функций-ограничений;	ξ – вектор неопределенных параметров;
h – структура системы автоматической стабилизации режимных переменных технологической системы;	$\varphi(\cdot)$ – показатель эффективности (целевая функция, критерий оптимальности) функционирования технологической системы;
r – технология (метод) производства;	χ – функция гибкости технологической системы;
s – вектор настроечных параметров САС;	Ω – множество ассортиментов производимой продукции, шт.;
u – вектор режимных переменных (заданий регуляторам САС);	ω – ассортимент производимой продукции.

Введение

Стремительное развитие вычислительной техники и информационных технологий в последней четверти XX и начале XXI века стало стимулом развития и применения математических методов в технике и технологиях, привело к необходимости выработки методологии математического моделирования сложных био- и химико-технологических систем (**БТС** и **ХТС**) и ознаменовалось массовым созданием пакетов моделирующих программ, предназначенных для анализа (исследования) эффективности их функционирования, оптимизации и интегрированного проектирования. Проектно-конструкторские решения при интегрированном проектировании БТС и ХТС принимаются в условиях неопределенности исходной информации (исходных данных для проектирования). Системный анализ процессов и аппаратов био- и химической технологий, компьютерное моделирование и цифровизация промышленных технологий, теория оптимизации и принятие решений в условиях неопределенности исходной информации становятся фундаментальными составляющими комплексного подхода к решению сложных задач синтеза (интегрированного проектирования) и исследования БТС и ХТС; становится востребованной разработка новой методологии – учения об организации деятельности при интегрированном проектировании работоспособных (гибких) энерго- и ресурсосберегающих био- и химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях неопределенности исходной информации [1 – 7].

Можно назвать несколько причин наличия неопределенности в исходной информации при постановке и решении задач оптимизации при интегрированном проектировании БТС и ХТС. *Первая* – неполнота, недостаточность знаний об окружающем мире и объекте проектирования (то есть неосведомленность относительно характеристик системы и окружающей среды, с которой система взаимодействует). Чем меньше мы обладаем знаниями в данной области, где следует принять решение, тем больше имеется неопределенности при принятии (выборе) решений. *Вторая* – случайность (случайностью называют то, что в сходных (похожих) условиях происходит неодинаково, причем заранее нельзя предсказать, что и как будет на этот раз). *Третья* – противодействие, специалисты полагают, что неопределенность, неясность поведения среды, при взаимодействии с которой происходит функционирование БТС и ХТС, появляется не сама по себе (то есть естественным путем), а насаждается искусственно (во вред нам).

Проблема выбора решения в условиях неопределенности состоит в следующем. При интегрированном проектировании БТС или ХТС происходит определение оптимальной с точки зрения какого-либо показателя эффективности (критерия оптимальности) φ «конструкции» производства (технологии, структуры технологической схемы и ее аппаратурно-технологического оформления, режи-

мов функционирования технологического оборудования в составе технологической схемы, системы автоматического управления режимами ее функционирования и т.д.). Обычно φ – экономический критерий – прибыль от эксплуатации производства, себестоимость продукции, приведенные затраты на осуществление производства и др.; при этом оптимальная «конструкция» производства должна гарантировать выполнение проектных требований (ограничений), связанных с производством заданного ассортимента продукции надлежащего качества; обеспечением выполнения технико-экономических показателей функционирования производства (задаваемых в техническом задании на проектирование и технологическом регламенте производства); безопасностью эксплуатации и экологической безопасностью производства.

В реальных условиях φ обычно зависит от конструктивных параметров $d \in D$ (технологии (метода) производства, структуры технологической схемы, типов и геометрических размеров технологического оборудования производства и т.д.), режимных переменных $u \in U$ функционирования процессов и аппаратов производства и неопределенных факторов $\xi \in \Xi$, то есть $\varphi \equiv \varphi(d, u, \xi)$. Понятно, что показатель эффективности функционирования производства φ зависит от ξ , то есть $\varphi \equiv \varphi(\dots, \xi)$, и не может быть вычислен (φ является неопределенным), а сама задача поиска оптимального решения теряет определенность. Присутствие неопределенных факторов ξ придает задаче оптимизации новое качество: она становится задачей о выборе решения (наилучшей альтернативы) в условиях неопределенности.

Удовлетворение проектных ограничений усложняется и наличием некоторой неопределенности (неточности) параметров в математических моделях процессов и аппаратов производства (стехиометрических уравнениях и уравнениях кинетики биохимических реакций, материального и теплового балансов БТС и ХТС и др.), используемых в технологических расчетах процессов и аппаратов при интегрированном проектировании производства.

При наличии случайных и неопределенных факторов задачи принятия решений при интегрированном проектировании технологических систем делят на два больших класса:

- стохастические задачи принятия решений или принятие решений при риске (принятое решение приводит к одному из множества возможных исходов, вероятности появления которых для лица, принимающего решения (ЛПР), известны);
- принятие решений в условиях неопределенности (принятое решение может привести к одному из множества возможных исходов, вероятности появления которых для ЛПР неизвестны).

На практике учет случайных факторов, заданных распределением вероятности, выполняют двумя способами:

- 1) заменой случайных параметров их математическими ожиданиями;
- 2) «взвешиванием» показателя качества по вероятности (данный способ иногда называют «оптимизация в среднем»).

В задачах оптимизации при интегрированном проектировании БТС и ХТС показатель эффективности φ обычно зависит от четырех групп факторов (d, u, y, ξ) , то есть $\varphi \equiv \varphi(d, u, y, \xi)$, где $d \in D$ – вектор искомых при проектировании конструктивных параметров БТС или ХТС (технология (метод) производства, структура технологической схемы, типы и геометрические размеры технологических аппаратов и технических устройств, обеспечивающих оптимальные условия осуществления технологических процессов и операций); $u \in U$ – вектор режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам системы автоматического управления) производства, реализуемых в технологических аппаратах БТС или ХТС.

Понятно, что создание новых энерго- и ресурсосберегающих технологий и производств становится бесперспективным без учета неопределенности исходной информации [8, 9]. Все это способствовало возникновению и становлению

теории гибкости технологических систем – теории создания (синтеза) работоспособных БТС и ХТС, функционирующих в соответствии с технологическим регламентом производства независимо от того, какие значения принимают неопределенные факторы из заданной области неопределенности Ξ на стадии проектирования БТС или ХТС. Существенное развитие данная теория получила в работах профессора Гроссмана И. Е. [Grossmann I. E.] и его сотрудников в университете имени Карнеги–Меллона (Питсбург, США) [1 – 4]. Согласно разработанной ими теории, при синтезе (интегрированном проектировании) технологических систем могут быть определены такие конструкции аппаратов, технологические схемы установок (структуры соединения аппаратов), режимы их функционирования и системы автоматического управления ими, при которых создаваемые технологические системы точно или с заданной вероятностью будут удовлетворять требованиям технического задания на проектирование производства. Условие работоспособности БТС и ХТС профессором Гроссманом И. Е. формализовано в виде функции гибкости, неположительное значение которой гарантирует работоспособность проектируемого технологического объекта в изменяющихся условиях эксплуатации вследствие частичной неопределенности исходных данных для проектирования [10].

Обычно неполнота знаний о проектируемой системе (БТС, ХТС) и окружающей среде, в которой ей предстоит функционировать, сводится к тому, что некоторые параметры в математических моделях при интегрированном проектировании производства мы знаем недостоверно (неточно); о них только известно, что они принадлежат некоторой области неопределенности Ξ . При этом различают внутренние и внешние неопределенные параметры: внутренние – характеризуют переменные состояния технологической системы (БТС, ХТС) – это могут быть константы скоростей биохимической реакции, коэффициенты процессов массо- и теплообмена, диффузии веществ и т.д; внешние – переменные состояния внешней среды по отношению к системе (БТС, ХТС) – переменные состояния входных и выходных потоков системы (температура, объемная скорость, концентрации веществ).

Следует выделить и другой случай, когда неизвестные (неопределенные) факторы ξ не являются случайными величинами (случайными функциями); в этом случае не имеет смысла говорить об их «законах распределения» или других вероятностных характеристиках. Здесь разумно выбрать некоторое компромиссное решение, приемлемое для всего диапазона Ξ возможного изменения неопределенных факторов ξ .

Цель работы – формализация постановок задач оптимизации при проектировании оптимальной «конструкции» БТС или ХТС (технологии, структуры технологической схемы и ее аппаратурно-технологического оформления, режимов функционирования технологических аппаратов и их реализация с помощью автоматических систем управления и т.д.) такой, что ее эксплуатация будет осуществляться строго в соответствии с технологическим регламентом производства независимо от изменения внутренних и внешних неопределенных факторов в заданной (допустимой) области их возможного варьирования.

Методология интегрированного проектирования

Анализ процесса интегрированного проектирования сложных технологических систем (БТС, ХТС) позволяет представить весь комплекс работ в виде последовательной схемы получения решений, включающей определение экономически целесообразных структур (технологий) R производства, класса B и структур H систем автоматического управления технологическим оборудованием производства, оптимальных конструктивных D , режимных U переменных аппаратурно-технологического оформления БТС или ХТС и настроечных параметров системы автоматического управления (САУ) исходя из целей проектируемого производства [9].

Решение задачи интегрированного проектирования оптимального автоматизированного комплекса «Технологическая система (БТС, ХТС) – САУ» невозможно простым перебором альтернативных структур (технологий) $r \in R$ получения заданного ассортимента биохимических продуктов $\omega \in \Omega$, типов $a \in A$ аппаратно-технологического оформления стадий производства, классов $b \in B$ и структур $h \in H$ САУ, векторов конструктивных $d \in D$, режимных $u \in U$ переменных технологической системы и настроечных параметров $s \in S$ САУ из-за высокой размерности задачи, нелинейности и нестационарности био- и химико-технологических процессов, сложности алгоритмов вычисления целевой функции (критерия оптимальности) интегрированного проектирования производства. Требуется декомпозиция задачи, разработка стратегии применения методов автоматизированного проектирования, поскольку допустимая область проектных параметров $\Omega \times R \times A \times B \times H \times D \times U \times S$ строится в ходе самого процесса проектирования. Этого можно добиться только на основе интегрированного подхода к проектированию производства, его аппаратно-технологического оформления и САУ в рамках единой постановки задачи.

Эффективность функционирования технологической системы (БТС, ХТС) в статических режимах оценивается показателем эффективности φ . При этом в качестве множества вариантов аппаратного оформления технологической системы A задаются альтернативные возможные конструкции машин и аппаратов $a \in A$. В данной статье в качестве класса систем автоматического управления режимами функционирования технологической системы (БТС, ХТС) непрерывного действия будем рассматривать САС режимных переменных.

Выбор структуры САС осуществляется с использованием множеств регулируемых (наблюдаемых) переменных и допустимых управляющих воздействий. При этом выбранные каким-либо образом структуры САС ранжируются по критерию экономической целесообразности с учетом наблюдаемости выходных переменных системы, оценки затрат на разработку необходимых приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемости системы с той или иной комбинацией управляющих воздействий, динамических свойств каналов управления (показателей инерционности и регулируемости объекта управления).

На *первом* шаге методологии интегрированного проектирования осуществляется перевод целей управления технологической системой в совокупность переменных состояния (или их функции) и выбираются наблюдаемые переменные состояния (или их функции), стабилизация (регулирование) которых соответствует поддержанию целевой функции функционирования технологической системы на оптимальном уровне. Если некоторые из них неизмеримы, то осуществляются косвенные измерения и восстановление требуемых переменных состояния по математической модели.

На *втором* шаге проводится исследование выполнения условия структурной наблюдаемости системы с использованием множества наблюдаемых переменных, выбранных на предыдущем шаге: 1) если проектируемая система (БТС, ХТС) структурно управляема, то выбранные наблюдаемые переменные на первом шаге и управляющие (независимые переменные на входе технологической системы) представляют допустимую структуру САС; 2) в случае невыполнения условий структурной наблюдаемости объекта управления, множество наблюдаемых переменных должно пополняться новыми опытными данными.

Полный анализ наблюдаемых переменных состояния технологической системы, управляющих и возмущающих воздействий включает также исследование ее статических и динамических характеристик. При этом определяются диапазон целесообразных изменений и предельные значения управляющих воздействий, чувствительность основных выходных переменных (наблюдаемых переменных состояния системы) по отношению к управляющим воздействиям, показатели инерционности и регулируемости системы по каналам управления.

Таким образом, прямое решение задачи синтеза технологической системы (БТС, ХТС) с заданными или оптимальными статическими и динамическими характеристиками сопряжено с необходимостью решения уравнений статики и линейных уравнений динамики в окрестности оптимального статического режима, вычисление показателей инерционности и регулируемости системы по каналам управления.

Для определения конструктивных и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных при проектировании аппаратно-технологического оформления технологической системы формулируются, как правило, одно- и двухэтапные задачи оптимизации в условиях интервальной неопределенности исходных данных для проектирования.

Постановки одноэтапных задач оптимизации при интегрированном проектировании технологических систем

При постановке одноэтапных задач оптимизации исходят из того факта, что конструктивные и режимные переменные (оптимальные задания регуляторам САС) технологической системы определяются на стадии проектирования и далее не изменяются при эксплуатации производства.

Вначале сформулируем одноэтапные задачи оптимизации с жесткими ограничениями, используя различные критерии оптимальности.

1. Критерий оптимальности $I(d, u) = M_{\xi}[\varphi(d, u, \xi)]$ – среднее значение показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности функционирования системы, которое он может принять в процессе эксплуатации производства. Объединяя данную целевую функцию с условием гибкости, получим постановку задачи оптимизации при интегрированном проектировании технологической системы в условиях неопределенности $\xi \in \Xi$:

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} \{I(d, u) = M_{\xi}[\varphi(d, u, \xi)]\}; \quad (1)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

2. При реализации стратегии наихудшего случая в качестве критерия оптимальности используется величина $\max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi)$, в этом случае одноэтапная задача оптимизации при проектировании технологической системы при наличии неопределенности имеет вид

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} \left\{ I(d, u) = \max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi) \right\}; \quad (3)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Сформулируем одноэтапные задачи оптимизации с мягкими ограничениями. Рассмотрим два случая, в которых будут использоваться вероятностные ограничения. Предположим, что при проектировании технологической системы имеется полная информация относительно функции распределения $P(\xi)$ вероятностей для вектора ξ неопределенных параметров; для этого случая можно сформулировать следующую задачу оптимизации:

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} I(d, u); \quad (5)$$

$$\Pr\{g_j(d, u, \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где $\Pr\{g_i(d, u, \xi) \leq 0\} = \int_{\Omega_j} P(\xi) d\xi$ – вероятность выполнения ограничения

$g_i(d, u, \xi) \leq 0$, $P(\xi)$ – функция плотности вероятности для ξ ;

$$\Omega_j = \{\xi \mid g_i(d, u, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi\};$$

левая часть равенства есть вероятность попадания случайной точки ξ в допустимую область Ω_j .

В качестве целевой функции $I(d, u)$ для задачи оптимизации при проектировании технологической системы можем использовать либо среднее значение первоначального показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства, либо наихудшее значение первоначального показателя $\max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi)$.

Если в задаче оптимизации при проектировании биотехнологической системы используется целевая функция $M_{\xi}[\varphi(d, u, \xi)]$, тогда ищем такую «конструкцию» технологической системы и режим ее функционирования, для которых средняя (по ξ) величина первоначального показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства минимальна. Если в задаче оптимизации при проектировании технологической системы используется целевая функция $\max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi)$, то при решении задачи оптимизации

находим минимальное (наихудшее по ξ) значение первоначального показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства.

Рассмотрим теперь формулировку, в которой в качестве критерия в задаче оптимизации при проектировании биотехнологической системы будет использоваться верхняя граница первоначального показателя эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$. Как и в предыдущей задаче оптимизации, будем считать, что каждое ограничение задачи должно выполняться с вероятностью не меньшей, чем $P_{\text{дов}}$. В этом случае математическая формулировка задачи с вероятностными ограничениями будет иметь следующий вид:

$$\min_{(d, u) \in D \times H, \alpha} \alpha; \quad (7)$$

$$\Pr\{\varphi(d, u, \xi) - \alpha \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}; , \quad (8)$$

$$\Pr\{g_i(d, u, \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

В задаче (7) – (9) определяем наименьшее значение α^* переменной α , для которой условия (8), (9) выполняются с заданной вероятностью $P_{\text{дов}}$; решением задачи (7) – (9) является точка $[d^*, u^*, \alpha^*]$.

Используя ту же целевую функцию, можно свести задачу оптимизации с жесткими ограничениями к следующей задаче оптимизации со смешанными ограничениями:

$$\min_{(d, u) \in D \times H, \alpha} \alpha; \quad (10)$$

$$\Pr\{\varphi(d, u, \xi) - \alpha \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}; , \quad (11)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_i(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

Сформулируем задачу оптимизации со смешанными ограничениями, в которой m_1 ограничений являются жесткими, а остальные $(m - m_1)$ – мягкими:

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} \{I(d, u) = M_\xi[\varphi(d, u, \xi)]\}; \quad (13)$$

$$\Pr\{g_i(d, u, \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_1; \quad (14)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_i(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = m_1 + 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

Постановка двухэтапной задачи оптимизации при проектировании технологических систем

При формулировании двухэтапных задач оптимизации исходят из предположения о том, что неопределенные параметры (или их часть) ξ могут быть идентифицированы на этапе эксплуатации производства, и в этом случае оптимальные задания регуляторам $u(\xi)$ могут быть изменены в целях выполнения регламентных требований и проектных ограничений, а также повышения эффективности производства. Решение двухэтапной задачи проектирования позволит определить оптимальные конструктивные переменные d^* и зависимости $u^*(\xi)$ режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам САС) от неопределенных параметров, которые могут изменяться в заданной области неопределенности Ξ , и далее на стадии эксплуатации технологической системы (БТС, ХТС) произвести расчет соответствующих оптимальных заданий регуляторам САС – $u^*(\hat{\xi})$ в зависимости от измеренных (уточненных) значений $\hat{\xi}$ вектора неопределенных параметров.

В двухэтапной задаче интегрированного проектирования возможны два случая: а) конструктивные переменные a, d не изменяются на этапе эксплуатации производства, в то время как переменные u могут изменяться; б) переменная a и часть конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = 1, 2, \dots, k_1$ не изменяются на этапе эксплуатации производства, в то время как другая часть конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = k_1 + 1, 2, \dots, k$; и режимные переменные u (оптимальные задания регуляторам САС) могут изменяться. В частности, это свойство позволяет настраивать другую часть конструктивных $d^\lambda, \lambda = k_1 + 1, 2, \dots, k$ параметров наряду с управляющими u переменными для выполнения проектных ограничений и повышения эффективности производства. Речь здесь идет о блочно-модульном аппаратурном оформлении технологической системы (БТС, ХТС), предполагающим наличие избыточного числа модулей в составе системы. Далее будем считать, что часть неизменяемых на этапе эксплуатации производства конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = 1, 2, \dots, k_1$ являются компонентами вектора d , а другая изменяемая часть конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = k_1 + 1, 2, \dots, k$ является компонентами вектора управляющих переменных u .

Сформулируем двухэтапную задачу оптимизации конструктивных и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных при использовании следующих предположений: 1) на этапе эксплуатации производства в каждый момент времени выполняется уточнение всех неопределенных параметров ξ тех-

нологической системы на основе доступной экспериментальной информации; 2) ограничения с номерами $j \in J_1 = \{1, 2, \dots, m_1\}$ являются жесткими, а ограничения с номерами $j \in J_2 = \{1, 2, \dots, m_1\}$ – мягкими и должны быть удовлетворены с заданной вероятностью $P_{\text{дов}}$.

В качестве критерия оптимизации двухэтапной задачи целесообразно использовать верхнюю границу α исходной целевой функции $\varphi(d, u, \xi)$:

$$I(d^*, u^*(\xi), \xi) = \min_{d, u(\xi), \alpha} \alpha; \quad (16)$$

$$\Pr_{\xi} \{g_0 = \varphi(d, u(\xi), \xi) - \alpha\} \geq P_{\text{дов}}; \quad (17)$$

$$\Pr_{\xi} \{g_i(d, u(\xi), \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j \in J_1; \quad (18)$$

$$\chi(d, J_2) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J_2} g_j(d, u, \xi) \leq 0. \quad (19)$$

В задаче (16) – (19) α – скалярная переменная, зависящая от значений конструктивных d и режимных u переменных (оптимальных заданий регуляторам САС).

Один из возможных алгоритмов решения задачи (1) – (4) показан в работе [11], в соответствии с которым осуществляется многомерная интерполяция функций $u \equiv u(\xi)$ по известным дискретным точкам $\xi^i, u^i, i \in I^{(v)}$ с помощью процедуры кусочно-постоянной аппроксимации или многомерных кубических сплайнов.

Заключение

Наиболее существенными результатами данной статьи являются методология интегрированного проектирования работоспособных (гибких) технологических систем (био- и химико-технологических систем), формирующих предпосылки эффективного управления и автоматизации, а также постановки одно- и двухэтапных задач оптимизации конструктивных параметров и режимных переменных (заданий регуляторам САС) технологической системы при интегрированном проектировании производства в условиях неопределенности.

Важным результатом также является методика выбора структуры системы автоматической стабилизации режимов работы технологической системы с использованием множеств регулируемых переменных и допустимых управляющих воздействий и учетом оценки затрат на разработку необходимых приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных координат технологической системы, ее управляемости с той или иной комбинацией управляющих воздействий при интегрированном проектировании технологических систем.

Ценность полученных результатов заключается в том, что при интегрированном проектировании технологических систем проектно-конструкторские решения принимаются в условиях неопределенности исходной информации (исходных данных для проектирования), и это обстоятельство учитывается в математической постановке задачи оптимизации. При решении задачи интегрированного проектирования получаем гарантированный результат устойчивого функционирования технологических систем в составе производства независимо от нашей несведомленности относительно точности неопределенных факторов в исходных данных для проектирования производства.

Методология интегрированного проектирования био- и химико-технологических систем может быть использована при интегрированном проектировании сложных технических и технологических систем различного назначения.

Список литературы

1. Grossmann, I. E. Optimum Design of Chemical Plants with Uncertain Parameters / I. E. Grossmann, R. W. H. Sargent // *AIChE Journal*. – 1978. – No. 4. – P. 1021 – 1028.
2. Halemane, K. P. Optimal Process Design under Uncertainty / K. P. Halemane, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 1983. – No. 29. – P. 425 – 433.
3. Floudas, C. A. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks with Uncertain Flowrates and Temperatures / C. A. Floudas, I. E. Grossmann // *Comp. Chem. Eng.* – 1987. – No. 4. – P. 319 – 336.
4. Biegler, L. T. Systematic Methods of Chemical Process Design / L. T. Biegler, I. E. Grossmann, A. W. Westerberg. – Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 1997. – 796 p.
5. Островский, Г. М. Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и оптимизация / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 319 с.
6. Дворецкий, Д. С. Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределенности / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский. – М. : Спектр, 2012. – 344 с.
7. Островский, Г. М. Оптимизация технических систем / Г. М. Островский, Н. Н. Зиядинов, Т. В. Лаптева. – М. : КНОРУС, 2012. – 432с.
8. Дворецкий, Д. С. Проектирование управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий в условиях неопределенности. Часть 1. Одноэтапные задачи и алгоритмы интегрированного проектирования / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский // *Вестник Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 66 – 85.
9. Дворецкий, Д. С. Проектирование управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий в условиях неопределенности. Часть 2. Двухэтапные задачи и алгоритмы интегрированного проектирования / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский // *Вестник Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 481 – 495.
10. Swaney, R. E. An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design. Part I: Formulation and theory / R. E. Swaney, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 1985. – Vol. 31, No. 4. – P. 621 – 644. doi: 10.1002/aic.690310412
11. Дворецкий, Д. С. Интегрирование проектирование гибких химико-технологических процессов, аппаратов и систем управления / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // *Теоретические основы химической технологии*. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 557 – 564. doi: 10.7868/S0040357114050030

Setting Optimization Problems in the Integrated Design of Technological Processes, Devices and Control Systems in Conditions of Uncertainty

S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky, E. I. Akulinin✉

*Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries,
bio-topt@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: flexible technological systems; integrated design; design parameters; optimality criterion; methodology; uncertainty in the initial information; one- and two-stage optimization problems; optimal tasks for regulators; mode state variables; automatic control system; functions-constraints.

Abstract: An attempt was made to develop a methodology for the integrated design of workable (flexible) technological processes, devices and systems (bio- and chemical-technological) and to formalize possible approaches to solving problems of optimizing design parameters and operating variables (optimal tasks for regulators of an automatic control system) at individual stages of a multi-stage iterative procedure for solving the problem of integrated design of technological systems under conditions of uncertainty. The formulation of one- and two-stage optimization problems in integrated design takes into account the presence of interval uncertainty of factors, which, provided they are solved, allows us to hope for achieving safe and optimal (in the sense of a minimum of reduced costs, the cost of manufactured products and other indicators of production efficiency) functioning of technological processes, devices and systems regardless of the presence of uncertain factors in the source information.

References

1. Grossmann I.E., Sargent R.W.H. Optimum Design of Chemical Plants with Uncertain Parameters, *AIChE Journal*, 1978, no. 4, pp. 1021-1028.
2. Halemane K.P., Grossmann I.E. Optimal Process Design under Uncertainty, *AIChE Journal*, 1983, no. 29, pp. 425-433.
3. Floudas C.A., Grossmann I.E. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks with Uncertain Flowrates and Temperatures, *Comp. Chem. Eng.*, 1987, no. 4, pp. 319-336.
4. Biegler L.T. Grossmann I.E., Westerberg A.W. *Systematic Methods of Chemical Process Design*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997, 796 p.
5. Ostrovskiy G.M., Volin Yu. M. *Tekhnicheskiye sistemy v usloviyakh neopredelennosti: analiz gibkosti i optimizatsiya* [Technical systems under conditions of uncertainty: flexibility analysis and optimization], Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008, 319 p. (In Russ.)
6. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskiy G.M. *Novyye podkhody k proyektirovaniyu khimiko-tekhnologicheskikh protsessov, apparatov i sistem v usloviyakh interval'noy neopredelennosti* [New approaches to the design of chemical-technological processes, devices and systems under conditions of interval uncertainty], Moscow: Spektr, 2012, 344 p. (In Russ.)
7. Ostrovskiy G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V. *Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem* [Optimization technical system], Moscow: KNORUS, 2012. – 432 p. (In Russ.)
8. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskiy G.M. [Design of controlled processes and apparatus of food and chemical technologies under conditions of uncertainty. Part 1. One-stage problems and integrated design algorithms], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 66-85. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskiy G.M. [Design of controlled processes and apparatus of food and chemical technologies under conditions of uncertainty. Part 2. Two-stage problems and integrated design algorithms], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 481-495.
10. Swaney R.E., Grossmann I.E. An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design. Part I: Formulation and theory, *AIChE Journal*, 1985, vol. 31, no. 4, pp. 621-644. doi: 10.1002/aic.690310412
11. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. [Integrated Design of Flexible Chemical Processes, Devices, and Control Systems], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2014, vol. 48, no. 5, pp. 557-564. doi: 10.7868/S0040357114050030 (In Russ., abstract in Eng.)

Feststellung der Optimierungsaufgaben beim integrierten Entwurf technologischer Prozesse, Apparate und Steuerungssysteme unter Unsicherheitsbedingungen

Zusammenfassung: Es ist der Versuch unternommen, eine Methodik des integrierten Entwurfs von funktionsfähigen (flexiblen) technologischen Prozessen, Apparaten und Systemen (bio- und chemisch-technologischen) zu entwickeln und mögliche Ansätze zur Lösung von Problemen der Optimierung von Entwurfsparametern und Betriebsgrößen (optimalen Zuweisungen zu den Reglern des automatischen Steuerungssystems) auf separaten Stufen eines mehrstufigen iterativen Verfahrens zur Lösung des Problems des integrierten Entwurfs von technologischen Systemen unter Unsicherheit zu formalisieren. Die Formulierungen der ein- und zweistufigen Optimierungsprobleme des integrierten Entwurfs berücksichtigen das Vorhandensein der Intervallunsicherheit der Faktoren, was bei ihrer Lösung die Hoffnung auf das Erreichen eines sicheren und optimalen (im Sinne eines Minimums an reduzierten Kosten, Produktionskosten und anderen Indikatoren der Produktionseffizienz) Funktionierens der technologischen Prozesse, Apparate und Systeme unabhängig vom Vorhandensein der unsicheren Faktoren in den Ausgangsinformationen ermöglicht.

Définition des objectifs d'optimisation pour la conception intégrée des procédés, des appareils et des systèmes de commande dans les conditions d'incertitude

Résumé: Est mis au point une méthodologie pour la conception intégrée des processus, des appareils et des systèmes technologiques (flexibles) utilisables (bio-, chimique et technologique) et pour la formalisation des approches possibles pour résoudre les problèmes d'optimisation des paramètres de conception et des variables de mode (tâches optimales pour les régulateurs du système de commande automatique) à certaines étapes d'une procédure itérative en plusieurs étapes pour résoudre le problème de la conception intégrée des systèmes technologiques dans des conditions d'incertitude. Les tâches d'optimisation en une ou deux étapes dans la conception intégrée tiennent compte de l'incertitude des facteurs d'intervalle, ce qui, si elles sont résolues, permet d'atteindre un fonctionnement sûr et optimal (en termes de coûts réduits minimaux, de coûts de production et d'autres indicateurs de l'efficacité de la production) des processus technologiques, des appareils et des systèmes, indépendamment de la présence des facteurs incertains dans l'information initiale.

Авторы: *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Дворецкий Дмитрий Станиславович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Акулинин Евгений Игоревич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ФРАГМЕНТА СИГНАЛА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ЛИНЕЙЧАТЫМ СПЕКТРОМ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ

С. С. Фролов✉, О. В. Худорожков, А. А. Лукьянчиков, П. А. Павлов

*Кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники,
frolovsergey7@mail.ru, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный
университет», Оренбург, Россия*

Ключевые слова: автоматизированное измерение; измерение частотных характеристик; прямоугольный спектр; равноамплитудный косинусоидальный ряд; равноамплитудный комплексный спектр; равноамплитудный полином.

Аннотация: Показана целесообразность измерения частотных характеристик (ЧХ) фильтров нижних частот (ФНЧ) при воздействии целым числом периодов дискретизированного сигнала с ограниченным равноамплитудным комплексным спектром (СОРКС), а также целесообразность синхронизации операции дискретного преобразования Фурье отклика ФНЧ с процессом формирования указанного СОРКС. Предлагаемые синхронизация и целое число периодов дискретизированного СОРКС позволяют получить спектр воздействия, близкий к равномерному линейчатому спектру непрерывного периодического СОРКС и без эффекта растекания. Тем самым упрощаются измерения ЧХ ФНЧ с малой погрешностью. Исследованы зависимости степени искажения спектра СОРКС, вызванного квантованием, от разрядности цифроаналогового преобразователя.

Введение

В процессе производства и установки радиоэлектронных [1], измерительных [2], инфо- и телекоммуникационных систем [3] востребованы процедуры автоматизированного контроля их частотных характеристик (ЧХ). Подобные системы автоматического анализа ЧХ выпускаются, например, группой компаний ZETLAB (Зеленоград, Россия) [4]. Для некоторых современных осциллографов резервируется операция автоматического построения диаграмм Боде четырехполюсников как дополнительная опция на заказ [5].

При автоматическом анализе ЧХ фильтров применяются следующие методы:

1) воздействие ЛЧМ-импульсом (ЛЧМ – линейная частотная модуляция) (сви́пирование частоты) с индикацией или анализом результата детектирования отклика [6 – 8];

2) воздействие на четырехполюсник шумом, близким к «белому» [9, 10];

3) автоматизация метода «генератор синуса – осциллограф» [5, 11].

Первым и вторым методами не измеряется фазочастотная характеристика (ФЧХ). Есть решения [12, 13], где современными ресурсами цифровой обработки сигналов (ЦОС) получают комплексную ЧХ при ЛЧМ-воздействии, но при этом задействуют более громоздкие операции ЦОС, чем в предлагаемой статье. Равномерность амплитуды ЛЧМ-импульса измерителей не меньше 0,3 дБ [6, 8], что соответствует 3,4 %. Что касается времени сви́пирования – для тестирования узлов звуковых устройств требуется от единиц до нескольких десятков секунд.

У промышленных широкополосных генераторов шума электронных приборов и псевд шума неравномерность спектральной плотности мощности не меньше 1 дБ (20 %). Низшая частота анализа – не менее 5 Гц.

Анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и ФЧХ вторым методом длится от нескольких секунд до десятков секунд.

Исследования в работе [14] связаны с применением функции вида

$$D_N(x) = \frac{\sin\{N x/2\}}{\sin(x/2)}, \quad x = 2\pi f t, \quad N = 2, 3, 4, \dots, \quad (1)$$

где N – число волн на период, с ограниченным равноамплитудным косинусоидальным рядом Фурье (диаграммы функции (рис. 1), пример спектрограммы (рис. 2, а)):

$$D_N(x) = \begin{cases} 1 + 2\cos(x) + 2\cos(2x) + \dots + 2\cos(Kx) & \text{при } N = 2K + 1 \\ 2\cos\left(\frac{x}{2}\right) + 2\cos\left(3\frac{x}{2}\right) + \dots + 2\cos\left((2K-1)\frac{x}{2}\right) & \text{при } N = 2K \end{cases} \quad (2)$$

непрерывным воздействием при анализе ЧХ. В источнике [14] функция (1) названа равноамплитудным полиномом (РАП). В статье используется тот же термин.

Равномерность спектра РАП (см. рис. 2, а) упрощает анализ ЧХ с малой погрешностью – отпадает необходимость приведения к спектру входного воздействия.

Но известные способы воспроизведения деформируют спектр исходной функции. В работе [14] исследованы искажения прямоугольности спектров РАП при цифровом формировании, вызванные дискретизацией (см. рис. 2). Искажения прямоугольности основного спектра (первая полоса на рис. 2, б) усложняют измерения АЧХ с малой погрешностью.

Цель работы – приблизить спектр формируемого РАП к прямоугольному линейчатому идеальной функции (1) и оценить погрешности отклонения, обусловленные математической моделью способа воспроизведения. Проблемы формирования РАП, вызванные дефектами электронных узлов, не рассматриваются.

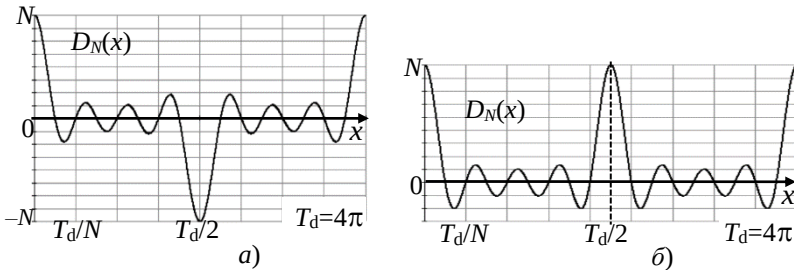


Рис. 1. Равноамплитудные полиномы при четном (а) и нечетном (б) N

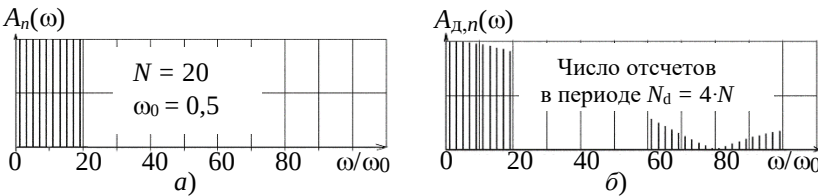


Рис. 2. Амплитудный спектр исходного (а) и дискретизированного равноамплитудного полинома при ступенчатой аппроксимации (б)

Проблемы формирования тестовых сигналов с прямоугольным линейчатым спектром в микропроцессорных системах

В работе [14] спектры, аналогичные рис. 2, б, рассчитаны без учета квантования, в предположении, что технически функция (1) формируется на выходе ЦАП, вид ее аппроксимации – ступенчатый.

Но дефекты (см. рис. 2, б) имеет смысл учитывать, если:

- либо измеритель спектра аналоговый;
- либо это специализированный анализатор с функцией быстрого преобразования Фурье (БПФ) или цифровой осциллограф с той же встроенной операцией БПФ (рис. 3) с частотой выборки $F_{s,2}$ на порядки большей частоты $F_{s,1}$ формирования РАП

$$F_{s,2} \gg F_{s,1}. \quad (3)$$

На практике условие (3) трудно выполнимо. Представленный на дисплее РАП (рис. 4) получен микроконтроллером платы NUCLEO-L073RZ (см. рис. 3) и состоит из $N_1 = 2048$ отсчетов. Из числа периодов N_p на дисплее ($\approx 17,5$) и параметра Time следует число отсчетов осциллографа $N_2 = 12\,000$ на фрагмент T и частота дискретизации формирователя $F_{s,1} \approx 15\,000\text{ с}^{-1} > F_{s,2} = S_a = 5\,000\text{ с}^{-1}$ (см. рис. 4). В итоге, для достижения только события $F_{s,2} > F_{s,1}$ следует уменьшить число периодов N_p минимум в 6 раз при том же числе отсчетов N_2 , сузив развертку Time. Условие (3) при этом обеспечивается недостаточно.

Известно, анализаторы спектра обрабатывают ограниченный отрезок функции, и от фрагмента периодического сигнала получают спектральную плотность, а не линейчатый спектр (см. рис. 4). Кроме того, максимумы при всех частотах гармоник РАП на дисплее неравномерны (на рис. 2 неравномерность наблюдается только в области правой границы основной полосы). Похожая деформация при дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) косинуса в учебном пособии названа *растеканием спектра* [15].

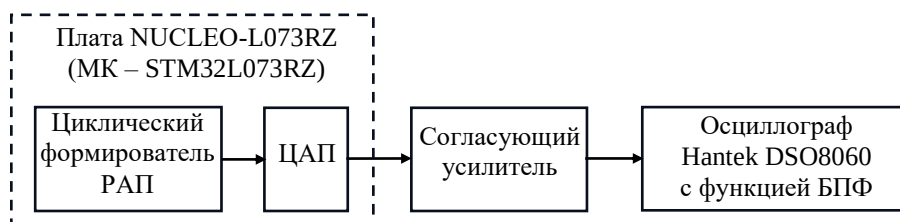


Рис. 3. Экспериментальная система исследования спектра РАП



Рис. 4. РАП и результат его БПФ на дисплее осциллографа при $N = 16$

Для приближения спектра (см. рис. 4) к линейчатому и сужения растеканий вокруг максимумов принято увеличивать длительность фрагмента T . Для выполнения условия (3) фрагмент следует уменьшить, оставив то же число отсчетов. То есть число периодов РАП следует уменьшить в 6 раз, сократив во столько же время анализа БПФ и усилив растекание спектра.

Условия получения дискретизированного равноамплитудного полинома с прямоугольным линейчатым спектром

В учебном пособии [15] обозначено условие эффекта растекания – ДПФ подвергается фрагмент с нецелым числом периодов. В программе MathCAD выполнены эксперименты с ДПФ для РАП при невыполнении соотношения

$$T = N_p T_d, N_p = \{1, 2, 3, \dots\}, \quad (4)$$

где T – длительность фрагмента, с; T_d – период РАП, с (см. рис. 1).

Итоги расчетов при разных комбинациях чисел N и нецелых значений N_p разного порядка подтвердили неравномерность локальных максимумов (рис. 5, а).

Эксперименты при условии (4) и целом числе выборок на волну (см. рис. 1)

$$N_s = (T_d/N)/\Delta t = T_d F_{s,1}/N, N_s = 2, 3, 4 \dots, \quad (5)$$

показали, что значения ДПФ – ненулевые только при частотах гармоник линейчатого спектра непрерывного РАП (рис. 5, б), причем все – одинаковые и вещественные.

Рассмотрим последнее явление. При условии (5) число выборок на период T_d

$$N_1 = N_s N, \quad (6)$$

а на N_p периодов

$$N_2 = N_1 N = N_p N_s N. \quad (7)$$

Дискретное преобразование Фурье рассчитываем на интервале частот

$$f \in (-0,5 N_2 df, 0,5 N_2 df) \quad (8)$$

с помощью выражения

$$S(n_1) = \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N_2-1} \left\{ D_N(k \Delta t) \exp \left(-i \frac{2\pi n_1}{N_2} k \right) \right\}, \quad (9)$$

где df – частотный шаг между выборками из спектра (9) с номерами n_1

$$df = 1/T = 1/(N_p T_d) = f_1/N_p, \quad (10)$$

величина f_1 – частота повторения РАП и расстояние между составляющими линейчатого спектра непрерывного РАП.

Из (10) следует, что

$$f_1 = N_p df,$$

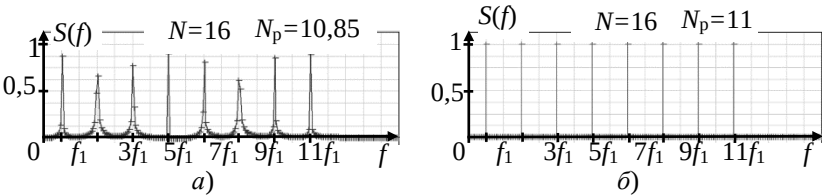


Рис. 5. Спектры при нецелом (а) и целом (б) числе периодов

n -й гармонике линейчатого спектра соответствует отсчет ДПФ с номерами

$$n1 = N_p n. \quad (11)$$

В рамках статьи за период (1) принято одинаковое значение $T_d = 4\pi$ для равноамплитудных полиномов и с четными, и с нечетными N (см. рис. 1).

С учетом (4) и (7) преобразуем выражение ДПФ (9)

$$S(n1) = \frac{1}{N1N_p} \sum_{k=0}^{N1-1} \left(D_{N,k} e^{-i \frac{2\pi n1}{N1N_p} k} \left\{ \sum_{k_p=0}^{N_p-1} e^{-i \frac{2\pi n1}{N_p} k_p} \right\} \right). \quad (12)$$

Разберем внутреннюю сумму (12) – сумму геометрической прогрессии

$$\sum_{k_p=0}^{N_p-1} e^{-i \frac{2\pi n1}{N_p} k_p} = \frac{1 - e^{-i \frac{2\pi n1}{N_p} N_p}}{1 - e^{-i \frac{2\pi n1}{N_p}}} = \frac{1 - e^{-i 2\pi n1}}{1 - e^{-i \frac{2\pi n1}{N_p}}} = \begin{cases} N_p & \text{при } n1 = nN_p \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Следовательно, спектр (12) ненулевой только при $n1 = nN_p$

$$S(nN_p) = \frac{1}{N1} \sum_{k=0}^{N1-1} D_{N,k} e^{-i \frac{2\pi n}{N1} k}. \quad (13)$$

В итоге, при условии (4) спектр (9) ненулевой только при частотах, кратных f_1 – при частотах составляющих *сумм комплексных рядов Фурье (КРФ)* непрерывного РАП (1). Выражения для КРФ получим из косинусоидальных (2):

– при $N = 2K$

$$D_N(x) = \sum_{k=-0,5N}^{0,5N-1} e^{i(2k+1)\frac{x}{2}}; \quad (14)$$

– при $N = 2K+1$

$$D_N(x) = \sum_{k=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} e^{ikx}. \quad (15)$$

Просчитаем расхождения между значениями выражения ДПФ (13) и спектра непрерывного РАП (рис. 6). Последний описывается выражениями:

– при $N = 2K$

$$C(n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 2k + 1, \quad -(N-1) \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{в остальных случаях;} \end{cases} \quad (16)$$

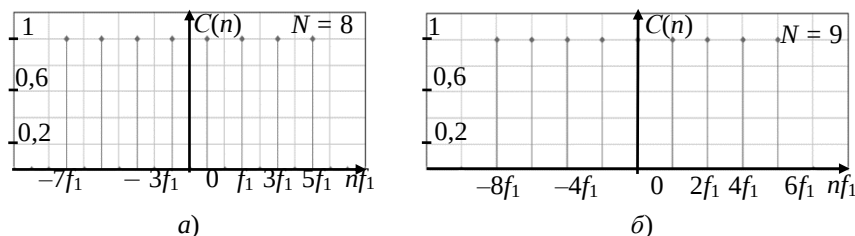


Рис. 6. Спектры комплексного ряда Фурье непрерывных РАП:

$a - N = 2K$; $b - N = 2K + 1$

– при $N = 2K + 1$

$$C(n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 2k, \quad -(N-1) \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (17)$$

Преобразуем ДПФ (13) при $N = 2K$, подставив вместо $D_{N,k}$ сумму (14):

$$S(nN_p) = \frac{\sum_{k=0}^{N1-1} \left[\sum_{n'=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} e^{i(2n'+1)\frac{4\pi k}{2N1}} e^{-i\frac{2\pi n}{N1}k} \right]}{N1} = \frac{\sum_{n'=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \left[\sum_{k=0}^{N1-1} e^{i(2n'+1-n)\frac{2\pi k}{N1}} \right]}{N1}.$$

Вторая сумма – тоже сумма геометрической прогрессии, следовательно

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{N1-1} e^{i(2n'+1-n)\frac{2\pi k}{N1}} &= \frac{1 - e^{i2\pi(2n'+1-n)}}{1 - e^{i\frac{2\pi(2n'+1-n)}{N1}}} = \begin{cases} N1 & \text{при } n = 2n'+1 \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow S(nN_p) &= \begin{cases} 1 & \text{при } n = 2k+1, \quad -(N-1) \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} = C(n). \end{aligned} \quad (18)$$

Рассматривая ДПФ (13) при $N = 2K+1$, заменим $D_{N,k}$ суммой ряда Фурье (15)

$$S(nN_p) = \frac{\sum_{k=0}^{N1-1} \left[\sum_{n'=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} e^{i\frac{4\pi k}{N1}} e^{-i\frac{2\pi n}{N1}k} \right]}{N1} = \frac{\sum_{n'=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \left[\sum_{k=0}^{N1-1} e^{i(2n'-n)\frac{2\pi k}{N1}} \right]}{N1}$$

и преобразуем аналогичную сумму геометрической прогрессии

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{N1-1} e^{i(2n'-n)\frac{2\pi k}{N1}} &= \frac{1 - e^{i2\pi(2n'-n)}}{1 - e^{i\frac{2\pi(2n'-n)}{N1}}} = \frac{1 - e^{i2\pi(2n'-n)}}{1 - e^{i\frac{2\pi(2n'-n)}{N1}}} = \begin{cases} N1 & \text{при } n = 2n' \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow S(nN_p) &= \begin{cases} 1 & \text{при } n = 2k, \quad -(N-1) \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} = C(n). \end{aligned} \quad (19)$$

Результаты (18) и (19) проверены в программе MathCAD (рис. 7, а, б) при числах N разного порядка (единицах, десятках, сотнях, тысячах).

Следовательно, спектр (9) дискретизированного РАП при условии (4) достаточно близок спектру непрерывного и сохраняет прямоугольность (см. рис. 6 и 7).

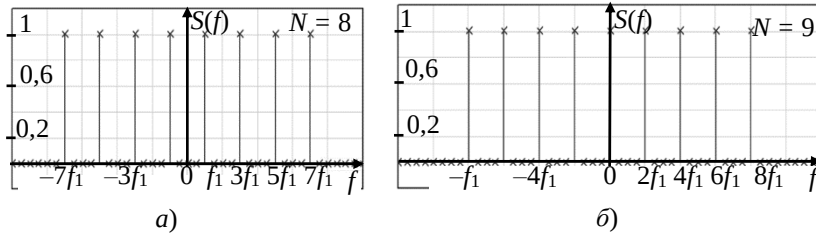


Рис. 7. Спектры целого числа периодов дискретизированных равноамплитудных полиномов при четном (а) и нечетном (б) числе N

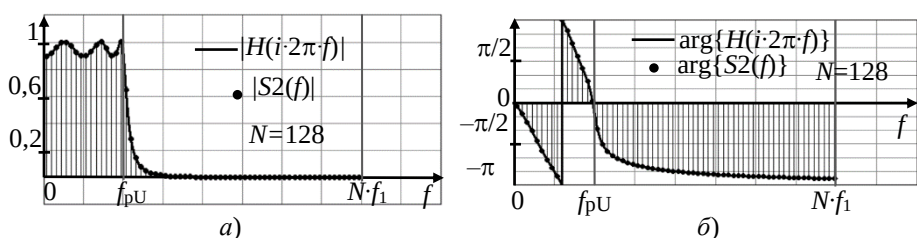


Рис. 8. Дискретное преобразование Фурье установившейся реакции ФНЧ-6 на фоне частотных характеристик:

a – АЧХ и амплитудный спектр; *б* – ФЧХ и фазовый спектр

Для возможности *систематического* получения анализатором Фурье результатов, аналогичных рис. 7, необходимо выполнение равенств (4) и (5). Последнее условие легко достижимо, если ДПФ подвергалась последовательность отсчетов $D_{N,k}$ при тех же фазовых значениях x_k , что и формировалась, то есть

$$F_{s,2} = F_{s,1}. \quad (20)$$

Соответственно, при выполнении условий (4), (5) и (20) не проявляется расхождение спектра и уменьшается погрешность ДПФ *установившейся* функции отклика исследуемого ФНЧ, улучшается точность анализа ЧХ (рис. 8).

Обеспечить длительность подвергаемого ДПФ фрагмента T , строго удовлетворяющую условию (4), технически возможно, если воздействовать дополнительным тактовым сигналом с тем же периодом T_d , или кратно меньшим ему на вход синхронизации цифрового осциллографа, выполняющего Фурье-анализ.

Но функции синхронизации самого процесса дискретизации в анализаторах Фурье пока не предусмотрено, соответственно, *систематическое* обеспечение условий (5) или (20) в измерительной схеме (см. рис. 3) пока трудно достижимо.

Обеспечить выполнение условий (4), (5) и (20) проще, если и формирование РАП и ДПФ отклика будут выполняться в одном микропроцессорном устройстве (рис. 9), фиксируя k -й отсчет отклика ФНЧ через АЦП непосредственно после установления напряжения k -й выборки РАП на выходе ЦАП. Для корректного функционирования системы необходимо выполнение условия

$$\Delta t \geq t_{DAC} + t_{ADC}, \quad (21)$$

где t_{DAC} и t_{ADC} – полное время преобразований соответственно ЦАП и АЦП с учетом времени установления аналоговых напряжений на их выводах.

Так как в рамках статьи не ставилась задача оценки технических возможностей предлагаемого метода, то скрупулезной оценки шага дискретизации относительно условия (21) не приведено. Известно только – при встроенных в микроконтроллер STM32L073 (см. рис. 3) ЦАП и АЦП он должен быть меньше 25 мкс.

Современные АЦП осциллографов и ЦАП генераторов сигналов произвольной формы могут функционировать на три-четыре порядка быстрее.

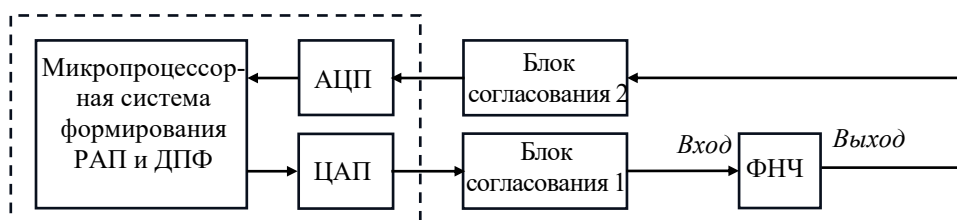


Рис. 9. Схема измерения ЧХ фильтров нижних частот с синхронизацией формирования целого числа периодов равноамплитудного полинома и ДПФ отклика

Исследование влияния квантования

Исследуем влияние квантования (диаграмма квантованной функции $D_{qN}(t, f_1)$, рис. 10), неизбежного при операции ЦАП, на погрешность измерения ЧХ.

Квантованные значения при числе разрядов Nb определены соотношением

$$D_{qN}(k \, dt) = \text{round} \left\{ \frac{D_N(k \, dt)}{N} (2^{Nb-1} - 1) \right\} \frac{N}{2^{Nb-1} - 1}, \quad (23)$$

где первый множитель в операции округления round – цифровой код, а РАП, как функция времени, рассчитывается

$$D_N(t) = \frac{\sin \{ N \, 2\pi \, f_1 \, t \}}{\sin(2\pi \, f_1 \, t)}. \quad (24)$$

Так как значения РАП – обоих знаков, при квантовании (23) максимуму N поставлена в соответствие половина цифровой шкалы $2^{Nb-1} - 1$ (см. рис. 10).

При поддержании равенства (4) при «оцифровке» РАП (24) в результатах ДПФ функции (23) ожидается следующее (рис. 11):

- отличие от единицы амплитуд элементов спектра в полосе $f \in (-Nf_1, Nf_1)$;
- ненулевые отсчеты ДПФ при частотах, кратных f_1 вне полосы $f \in (-Nf_1, Nf_1)$;
- на основании выкладок (12) – (13) выборки ДПФ при частотах, не кратных f_1 – нулевые, как и соответствующие отсчеты ДПФ неквантованных РАП.

Результаты ДПФ функции (23) в MathCAD подтвердили перечисленные ожидания. Кроме того, они не нулевые не просто для частот, кратных f_1 , а при:

- $f = (2k + 1) \cdot f_1$ при четных N (рис. 11, а);
- $f = 2k \cdot f_1$ при четных N (рис. 11, б).

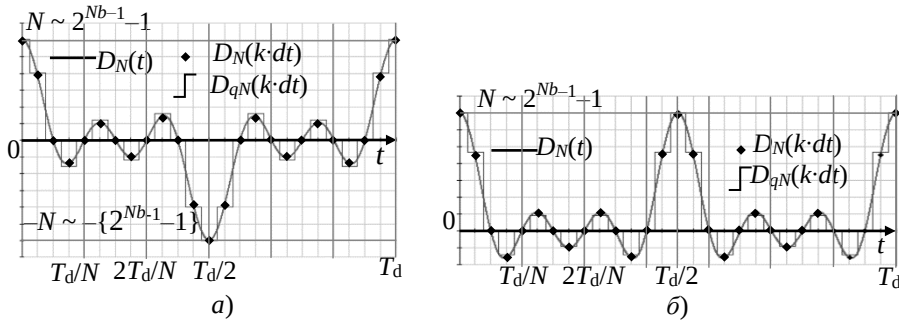


Рис. 10. Диаграммы квантованных РАП (разрядность $Nb = 5$):

а – $N = 6$, б – $N = 7$

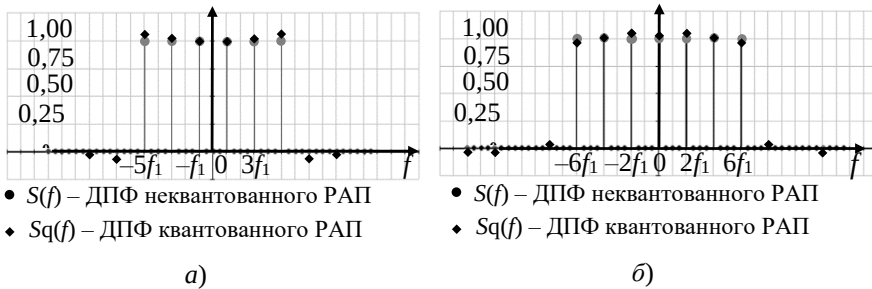


Рис. 11. Спектры при $N = 6$ (а) и $N = 7$ (б), число периодов $N_p = 2$

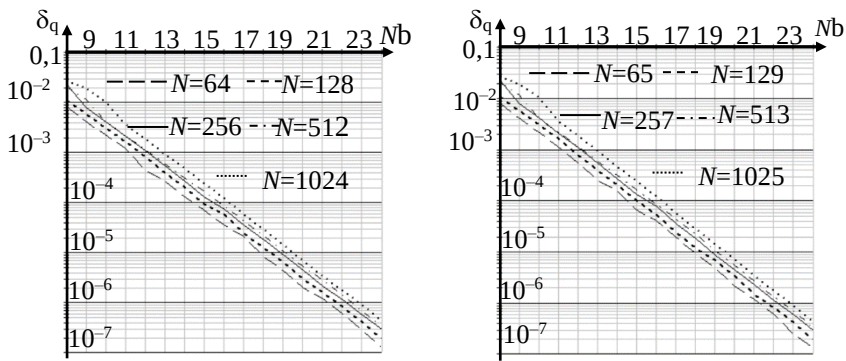


Рис. 12. Зависимость искажения спектра РАП, обусловленных квантованием, от разрядности Nb

Следовательно, в полосе $f \in (-Nf_1, Nf_1)$ спектр квантованного РАП существует в тех же точках, что и дискретизированного неквантованного.

Расчеты при разных числах N и разрядностях Nb показали – спектр S_q квантованного РАП тоже реальный, фазы при $f \in (-Nf_1, Nf_1)$ – нулевые (см. рис. 11).

Искажения, вносимые в спектр квантованием, оценили по СКО критерию

$$\delta_q = \sum_{n=0}^{N/2-1} \sqrt{\frac{[|S_n| - |S_{qn}|]^2}{0,5 N 1}}, \quad (25)$$

где $0,5N1$ в знаменателе – число ненулевых отсчетов в ДПФ квантованного РАП.

Зависимости искажений (25) от разрядности (рис. 12) просчитаны для

$$Nb = 8 \dots 24. \quad (26)$$

Максимум в (26) – максимальная разрядность современных ЦАП.

Диаграммы зависимостей (см. рис. 12) показывают следующее:

- ожидаемое убывание искажений δ_q при росте разрядности Nb ;
- при максимальной разрядности $Nb = 12$ встроенных в микроконтроллеры ЦАП можно уменьшить искажения спектра до 0,1 % при $N = 128 \dots 512$;
- при одной и той же разрядности Nb с ростом N искажения увеличиваются.

Последнее объясняется малыми кодами амплитуд неосновных полувольт (см. рис. 10), обратно пропорциональными числу N

$$n_q \sim (2^{Nb-1} - 1)/N. \quad (27)$$

Заключение

Синхронное формирование целого числа периодов тестового равноамплитудного полинома и дискретного преобразования Фурье отклика фильтров нижних частот в единой микропроцессорной системе анализа частотных характеристик позволяет: избежать растекания спектров, получить прямоугольный спектр дискретизированного фрагмента РАП, с высокой степенью точности близкий спектру такого же непрерывного периодического воздействия.

Без учета дефектов ЦАП, АЦП и согласующих усилителей искажения прямоугольности тестового спектра обусловлены только квантованием равноамплитудного полинома и зависят от разрядности ЦАП и АЦП. При разрядности 12 современных ЦАП и $N = 128 \dots 512$ вносимая квантованием неравномерность спектра меньше 0,1 %.

Полученные результаты полезны при разработке более точных автоматизированных систем анализа частотных характеристик фильтров нижних частот. Ограничение диапазона частот анализа зависит от ограничений на частоту дискретизации, зависящей от максимальной тактовой частоты микропроцессорной системы РАП и ДПФ.

Список литературы

1. Пат. 2025899 Российская Федерация, МПК H04B 3/46. Устройство для контроля и настройки амплитудно-частотных характеристик / К. А. Семенов, В. А. Марков, В. П. Шаров, С. Н. Булкин, В. В. Зинковский, В. Б. Турчаков, А. Н. Маринич, Е. В. Комиссаров, В. И. Баландин, В. А. Шалаев ; заявитель Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С.О. Макарова, патентообладатель Государственная морская академия им. адм. С.О. Макарова. – № 4676485/09 ; заявл. 11.04.1989 ; опубл. 30.12.1994, Бюл. № 36. – 15 с.
2. Пат. 2721018 Российская Федерация, МПК G01R 27/28. Способ контроля амплитудно-частотной характеристики фильтра / Ю. Н. Цыбин ; заявитель и патентообладатель АО «Научно-исследовательский институт командных приборов». – № 2019108858 ; заявл. 26.03.2019 ; опубл. 15.05.2020, Бюл. № 14. – 7 с.
3. Петросьянц, В. В. Автоматизация процесса снятия амплитудно-частотных характеристик электронных устройств / В. В. Петросьянц, А. Д. Бурындина // Молодой ученый. Технические науки. – 2017. – № 22 (156). – С. 65 – 68.
4. Антонов, А. Ю. Снятие АЧХ в автоматическом режиме. – Текст электронный / А. Ю. Антонов // ЗЭТЛАБ – Зелиноградская ЭлектроТехническая ЛАБОратория. – URL : <https://zetlab.com/podderzhka/vibrometriya-i-akustika/kalibrovka-i-prakticheskoe-primenenie-akselerometrov/avtomatizatsiya-proizvodstvennyih-protssosov-snyatie-achh/> (дата обращения: 10.09.2023).
5. RIGOL. Digital Oscilloscope. MSO5000 Series. Features – Текст электронный. – URL : <https://www.rigol.eu/products/oscillosopes/MSO5000%20series.html> (дата обращения: 10.09.2023).
6. Прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик X1-40. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Текст электронный. – М. : ВО «МАШПРИБОРИНТОРГ». – 1980. – 102 с. – URL : <https://www.qrz.ru/schemes/download/12917> (дата обращения: 02.09.2023).
7. Прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик X1-42. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Текст электронный. – URL : https://www.astena.ru/DOWNLOAD/x1-42_teh.zip (дата обращения: 02.09.2023).
8. Прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик X1-55. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Текст электронный. – URL : <https://www.astena.ru/DOWNLOAD/x1-55.zip> (дата обращения: 02.09.2023).
9. Г2-59. Генератор шума. – Текст электронный / Приборэлектро. – URL : <https://priborelektro.ru/radioizmeritelnye-i-elektroizmeritelnye-pribory/generatory/generatory/product-23146/> (дата обращения: 02.09.2023).
10. Г2-12. Генератор шума. – Текст электронный / СтандартПрибор. – URL : <https://standart-pribor.com.ua/product/g2-12-generator-shuma/> (дата обращения: 02.09.2023).
11. Анализатор частотных характеристик АЧХИ-102. Руководство по эксплуатации. Паспорт. – Текст электронный / Общество с ограниченной ответственностью «Челэнергоприбор». – Челябинск. – 2020 г. – 31 с. – URL : https://www.terra-kip.ru/files/products/094b8c44-4911-11e4-940c-00155d00120a_fac8d276-9363-11eb-80eb-00155d001238.pdf (дата обращения: 02.09.2023).

12. Ильин, Н. В. Моделирование регистрируемого спектра и восстановление передаточной функции широкополосного коротковолнового ионосферного радиоканала при зондировании ЛЧМ-сигналом / Н. В. Ильин, М. А. Давыденко, В. В. Хахинов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 387 – 395.

13. Реализация метода восстановления передаточной функции ионосферного радиоканала по результатам зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом / А. В. Подлесный, В. П. Лебедев, Н. В. Ильин, В. В. Хахинов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 63 – 70.

14. Фролов, С. С. Разработка методов повышения точности информационно-измерительных систем параметров амплитудно-фазочастотных характеристик : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / Фролов Сергей Сергеевич. – Самара, 2008. – 192 с.

15. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.

Reproduction of a Signal Fragment with a Rectangular Line Spectrum of a Measuring System for Frequency Characteristics of Low-Pass Filters

S. S. Frolov✉, O. V. Khudorozhkov, A. A. Lukyanchikov, P. A. Pavlov

*Department of Industrial Electronics and Information Measuring Technology,
frolovsergey7@mail.ru; Orenburg State University, Orenburg, Russia*

Keywords: automated measurement; measurement of frequency responses; rectangular spectrum; equal-amplitude cosine series; equal-amplitude complex spectrum; equal-amplitude polynomial.

Abstract: The article shows the expediency of measuring the frequency responses (FR) of low-pass filters (LPF) when exposed to an integer number of periods of a sampled signal with a limited equal-amplitude complex spectrum (LEACS), as well as the expediency of synchronizing the operation of discrete Fourier transform of the LPF response with the process of forming the specified. The proposed synchronization and an integer number of periods of the discretized LEACS make it possible to obtain an impact spectrum close to the uniform line spectrum of a continuous periodic LEACS and without the spreading effect. This simplifies measurements of the frequency response of low-pass filters with a small error. The dependence of the degree of distortion of the LEACS spectrum caused by quantization on the bit capacity of the digital-to-analog converter has been studied.

References

1. Semenov K.A., Markov V.A., Sharov V.P., Bulkin S.N., Zinkovsky V.V., Turchakov V.B., Marinich A.N., Komissarov E.V., Balandin V.I., Shalaev V.A. *Ustroystvo dlya kontrola i nastroyki amplitudno-chastotnich charakteristik* [Device for monitoring and adjusting amplitude-frequency characteristics], Russian Federation, 1994, Pat. 2025899 (In Russ.).

2. Tsybin Yu.N. *Sposob kontrola amplitudno-chastotnich charakteristik filtra* [Method for monitoring the amplitude-frequency response of a filter], Russian Federation, 2020, Pat. 2721018 (In Russ.).

3. Petrosyants, V.V., Buryndina A.D. [Automation of the process of taking amplitude-frequency characteristics of electronic devices], *Molodoy uchenyy. Tekhnicheskiye nauki* [Young scientist. Technical sciences], 2017, no. 22(156), pp. 65-68. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Antonov A.Yu. [Removing the frequency response in automatic mode], available at: <https://zetlab.com/podderzhka/vibrometriya-i-akustika/kalibrovka-i-prakticheskoe-primeneniye-akselerometrov/avtomatizatsiya-proizvodstvennyih-protseessov-snyatie-achh/> (accessed 10 September 2023).
5. available at: <https://www.rigol.eu/products/oscillosopes/MSO5000%20series.html> (accessed 10 September 2023).
6. available at: <https://www.qrz.ru/schemes/download/12917> (accessed 10 September 2023).
7. available at: https://www.astena.ru/DOWNLOAD/x1-42_teh.zip (accessed 02 September 2023).
8. available at: <https://www.astena.ru/DOWNLOAD/x1-55.zip> (accessed 02 September 2023).
9. available at: <https://www.priborelektro.ru/product/catalog/g2-generatory-shuma-6/137.html> (accessed 02 September 2023).
10. available at: <https://standart-pribor.com.ua/product/g2-12-generator-shuma/> (accessed 02 September 2023).
11. available at: https://www.terra-kip.ru/files/products/094b8c44-4911-11e4-940c-00155d00120a_fac8d276-9363-11eb-80eb-00155d001238.pdf (accessed 02 September 2023).
12. Ilyin N.V., Davydenko M.A., Khakhinov V.V. [Modeling of the recorded spectrum and restoration of the transfer function of a broadband short-wave ionospheric radio channel when sounding with a chirp signal], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika* [News of higher educational institutions. Radiophysics], 2007, vol. 50, no. 5, pp. 387-395. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Podlesny A.V., Lebedev V.P., Ilyin N.V., Khakhinov V.V. [Implementation of a method for restoring the transfer function of an ionospheric radio channel based on the results of sounding the ionosphere with a continuous chirp signal], *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2014, vol. 19, no. 1, pp. 63-70. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Frolov S.S. *PhD Dissertation (Engineering)*, Samara, 2008, 192 p. (In Russ.)
15. Sergiyenko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], St. Petersburg: Piter, 2002, 608 p. (In Russ.)

Wiedergabe von Signalfragmenten mit einem rechteckigen linearen Spektrum des Frequenzgangmesssystems der Tiefpassfilter

Zusammenfassung: Es ist gezeigt, wie zweckmäßig es ist, die Frequenzcharakteristik (FC) von Tiefpassfiltern (LPF) zu messen, wenn sie einer ganzen Anzahl von Perioden des digitalisierten Signals mit einem begrenzten komplexen Spektrum gleicher Amplitude (EACS) ausgesetzt sind, und wie zweckmäßig es ist, die diskrete Fourier-Transformation der LPF-Antwort mit dem Prozess der Bildung des oben erwähnten EACS zu synchronisieren. Die vorgeschlagene Synchronisation und eine ganzzahlige Anzahl von Perioden des digitalisierten SORCS ermöglichen es, ein Einfluss-Spektrum zu erhalten, das einem gleichmäßigen linearen Spektrum des kontinuierlichen periodischen SORCS nahe kommt und keinen Spreizeffekt aufweist. Dadurch werden die Messungen der VLF MTF mit einem kleinen Fehler vereinfacht. Es ist die Abhängigkeit des Grads der durch Quantisierung verursachten Verzerrung des SORCS-Spektrums von der Bitkapazität des Digital-Analog-Wandlers untersucht.

Reproduction d'un fragment de signal à spectre linéaire rectangulaire du système de mesure de réponse en fréquence des filtres passe-bas

Résumé: Est montrée l'utilité de la mesure des caractéristiques de fréquence (CF) des filtres passe-bas (FPB) lorsqu'ils sont exposés à un nombre entier de fréquences d'un signal échantillonné à spectre complexe à amplitude égale limitée (SESCAEL), ainsi que de la synchronisation de l'opération de la transformion discrète de la réponse de Fourier FPB avec le processus de formation SESCOEL. La synchronisation proposée et le nombre entier de périodes de SESCOEL discrétisé permettent d'obtenir un spectre de rendement proche du spectre linéaire uniforme de SESCOEL périodique continu et sans effet d'étalement. Ainsi sont simplifiées les mesures de CF FPB avec une faible erreur. Sont étudiées les dépendances du degré de distorsion du spectre de SESCOEL causées par la quantification à partir du nombre de bits du convertisseur numérique-analogique.

Авторы: *Фролов Сергей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники; *Худорожков Олег Викторович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной электроники и информационно-измерительной техники; *Лукьянчиков Алексей Андреевич* – магистрант; *Павлов Павел Александрович* – студент, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург, Россия.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОПАСНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ

А. В. Чернухин✉, Т. В. Савицкая, А. М. Сверчков, А. В. Дементийенко

*Кафедра кибернетики химико-технологических процессов, chernukhin.a.v@muctr.ru;
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия*

Ключевые слова: информационная система эвакуации; модель распространения пламени; модель эвакуации; программное приложение; сбор данных.

Аннотация: Рассмотрена задача моделирования эвакуации с производственных объектов. Даны описания современных алгоритмов и моделей эвакуации, распространения огня и дыма. В среде программирования Delphi разработано программное приложение, предназначенное для моделирования эвакуации сотрудников в случае возникновения чрезвычайной ситуации с учетом распространения пламени и дыма, реализующее индивидуально-поточную модель. Представлена апробация программного приложения для различных случаев эвакуации.

Введение

В настоящее время активно продолжается автоматизация всех отраслей промышленного производства, которая приводит к усложнению инфраструктуры предприятия, представляющего многоуровневую информационно-техническую систему. Также, по статистическим данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России, в период с 2017 по 2021 гг. число пожаров на производственных объектах, прямой материальный ущерб от них, а также число погибших неуклонно увеличивалось. Потому возникла необходимость в создании комплексной информационной системы, внедрение которой направлено на своевременную организацию и проведение эвакуации [1, 2].

Ключевой компонент такой системы – программное приложение, производящее моделирование эвакуации в реальном времени для определения оптимальных маршрутов эвакуации каждого из сотрудников. В Российской Федерации приказами МЧС № 382 [3] и № 404 [4] закреплены три модели, которые могут использоваться для моделирования эвакуации: упрощенная аналитическая, имитационно-стохастическая и индивидуально-поточная. Чтобы соответствовать законодательной базе и иметь возможность применения программного приложения для моделирования эвакуации на реальных объектах, необходимо выбрать для реализации одну из этих моделей.

Как показывает практика, для повышения точности моделирования эвакуации необходимо учитывать распространение пламени и дыма на предприятии в случае чрезвычайной ситуации (ЧС). Данные факторы могут выступать в качестве препятствий на отдельных эвакуационных путях, что может повлечь либо увеличение общего времени эвакуации, либо, в крайнем случае, невозможность эвакуации отдельных сотрудников из близкорасположенных к источнику возго-

рания помещений. Такие результаты моделирования повлекут модернизацию нагруженных эвакуационных маршрутов, что поможет в дальнейшем избежать жертв среди сотрудников [5, 6]. Поэтому в процессе разработки необходимо выбрать оптимальное свободно распространяемое программное обеспечение (ПО), реализующее модель распространения пламени и дыма на предприятии и внедрить его в работу программного комплекса.

Постановка задачи

Цель работы – построение специализированного ПО для моделирования эвакуации с опасных производственных объектов.

Для ее реализации поставлены и решены следующие *задачи*:

- 1) анализ отечественных аналогов на предмет использования в режиме реального времени;
- 2) разработка алгоритмов распространения пламени, дыма и эвакуации персонала;
- 3) реализация и апробация программных средств на примерах реальной эвакуации;
- 4) описание и сравнение полученных данных.

Разработанное программное приложение позволит моделировать эвакуацию с учетом распространения пламени и дыма, а также решать комплекс исследовательских задач. Например, при заданных условиях о местоположении и количестве сотрудников, очаге возгорания, расположении и числе эвакуационных выходов можно провести комплексный анализ различных сценариев эвакуации.

Анализ отечественных аналогов

Для анализа актуальности данной разработки проведен анализ отечественных аналогов разрабатываемого комплекса:

1) Urban (разработчик – «Инвест Лайн +»), реализующий индивидуально-поточную модель. По итогам моделирования не проводится оптимизация полученных значений. Обладает доступным и интуитивно-понятным интерфейсом. Его время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета пятиэтажного объекта, принимается за эталон для оценки других моделей;

2) FireCat, реализующий индивидуально-поточную модель, имеет сложный интерфейс и слишком высокую стоимость. Время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета (пятиэтажный объект), на 30 % выше аналогов;

3) TOXI+Risk, реализующий упрощенную аналитическую модель. С использованием данной модели определяется расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей. Время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета, на 30 % выше аналогов;

4) Fenix+ (разработчик – «Современные программные технологии»), обладающий самым мощным инструментарием, включающим возможность моделирования пожара и распространения опасных веществ, но имеющий наибольшую стоимость из всех. Время, затрачиваемое на проведение стандартного расчета, на 15 % выше аналогов.

Следовательно, ни один из программных комплексов из-за разных причин не может использоваться в комплексной информационной системе эвакуации в реальном времени, а применяется для предварительных оценок соответствия здания требованиям пожарной безопасности МЧС.

Описание разработанных алгоритмов моделирования эвакуации

В рамках разработки программного приложения по моделированию эвакуации реализуется индивидуально-поточная модель, так как она наиболее точно описывает процесс движения каждого отдельного сотрудника в потоке и, следовательно, полученные при ее использовании результаты будут значительно лучше коррелировать с реальным временем эвакуации. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1, где даны следующие обозначения: i – id-сотрудника; j – id-участка, на котором он находится; m – число участков; k – количество сотрудников; t_i^a – реальное время начала эвакуации; t_i^3 – время задержки, dt – приращение по времени (принимается равным 0,25 с); z – количество эвакуировавшихся (пересекших последний участок маршрута).

Для моделирования эвакуации предварительно задаются всевозможные ее маршруты с производственного объекта, разбивающиеся на число участков j (могут быть как наклонными, так и горизонтальными), имеющие длину a и ширину b , которые указываются равными проектным значениям. Длина участка в дверном проеме принимается равной нулю.

При моделировании используются заранее заданные габариты человека, которые содержатся в базе данных: эллипс, оси которого отображают ширину в плечах и толщину человека соответственно и координаты каждого сотрудника x_i – расстояние от центра эллипса до конца эвакуационного участка, на котором он находится (берутся из базы, в которую записываются с «умного датчика») [7].

Плотность однородного людского потока на j -м участке пути $D_{vj}(t)$ определяется по формуле

$$D_{vj}(t) = \frac{N_j f dt}{a_j b_j}, \quad (1)$$

где N_j – количество людей на j -м участке, человек; f – площадь горизонтальной проекции человека, m^2 ; dt – временной интервал, с; a_j, b_j – длина и ширина j -го участка пути соответственно, м.

Пропускная способность каждого участка пути вычисляется по формуле

$$Q_j(t) = \frac{q_j(t) c_j dt}{60 f}, \quad (2)$$

где $q_j(t)$ – интенсивность движения на выходе с j -го эвакуационного участка в момент времени t , м/мин; c_j – ширина выхода с j -го эвакуационного участка, м.

Плотность потока перед каждым человеком определяется по формуле

$$D_j(t) = \frac{(n(t)-1) f}{b \Delta x}, \quad (3)$$

где $n(t)$ – количество людей в группе в момент времени t , человек; Δx – разность координат последнего и первого человека в группе, м.

В момент времени t определяется число людей z с отрицательными координатами $x_i(t)$. Если значение $z \leq Q_j(t)$, то все m человек переходят на следующий эвакуационный участок. Если значение $z > Q_j(t)$, то число человек, равное значению $Q_j(t)$, переходят на следующий эвакуационный участок, а число человек, равное значению $(m - Q_j(t))$, не переходят на следующий эвакуационный участок и их координатам присваиваются значения $x_i(t) = 0,25r + 0,25$, где r – номер ряда,

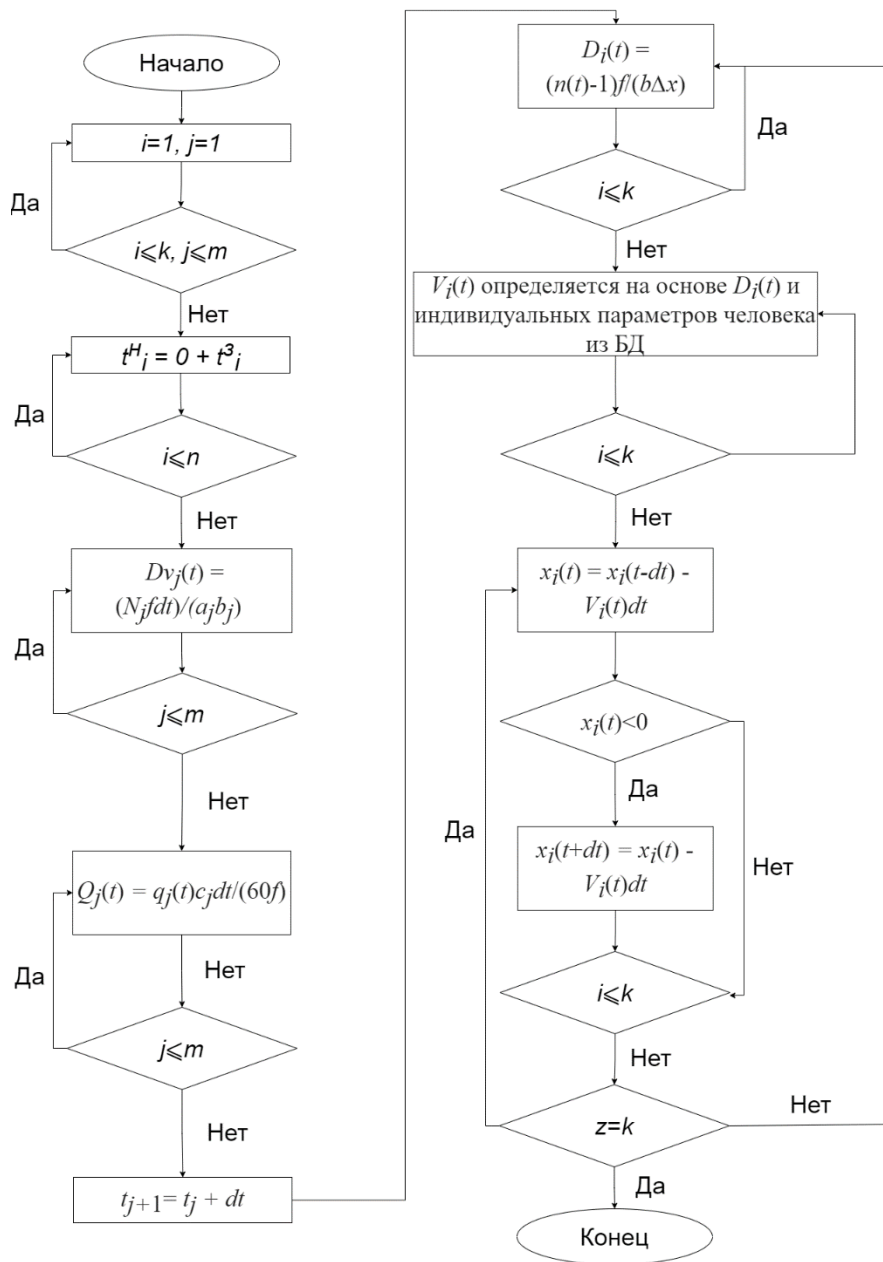


Рис. 1. Блок-схема алгоритма индивидуально-поточной модели

в котором будут находиться люди (максимально возможное количество человек в одном ряду для каждого эвакуационного участка определяется перед началом расчетов как отношение ширины участка b_j к средней ширине человека в плечах). Таким образом, возникает скопление людей перед выходом с эвакуационного участка. На основе заданных начальных условий (начальных координат людей, параметров эвакуационных участков) определяются плотности людских потоков на путях эвакуации и пропускные способности выходов с эвакуационных участков.

Далее, в момент времени $t_j = t_{j-1} + dt$ определяется наличие опасных факторов пожара (**ОФП**) на путях эвакуации. В зависимости от этого выбирается направление движения каждого человека и вычисляется новая координата каждого человека

$$x_i(t) = x_i(t - dt) - V_i(t) dt, \quad (4)$$

где $x_i(t - dt)$ – координата i -го человека в предыдущий момент времени, м; $V_i(t)$ – скорость i -го человека в момент времени t , м/с.

Скорость i -го человека $V_i(t)$ в момент времени t определяется по приложению к методике в зависимости от локальной плотности потока, в котором он движется, $D_i(t)$ и типа эвакуационного участка. После этого снова определяются плотности людских потоков на путях эвакуации и пропускные способности выходов. Затем вновь дается приращение по времени dt и определяются новые координаты людей с учетом наличия ОФП на путях эвакуации в данный момент времени. Далее процесс повторяется. Расчеты проводятся до тех пор, пока сотрудники не будут эвакуированы из здания.

В качестве модели распространения пламени и дыма используется Fire Dynamics Simulator (**FDS**). Модель разработана совместно Национальным институтом стандартов и технологий США (*англ.* National Institute of Standards and Technology (**NIST**)) и VTT Техническим исследовательским центром Финляндии (*англ.* VTT Technical Research Centre).

Причем, FDS использует гидродинамическую модель для вычисления перемещения воздушных потоков, вызванных пожаром. Для этого решаются уравнения Навье–Стокса, описывающие низкоскоростные потоки, вызванные изменением температуры, позволяющие рассчитать распространение дыма и распределение температуры [8]:

$$\partial \vec{u} / \partial t = -(\vec{u} - \nabla) \vec{u} - (1 - \rho) \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}, \quad (5)$$

где $\partial \vec{u} / \partial t$ – изменения скорости жидкости в точке пространства (рассчитывается для каждой частицы); $-(\vec{u} - \nabla) \vec{u}$ – перемещение жидкости в пространстве; $(1 - \rho) \nabla p$ – давление, оказываемое на частицу (ρ – коэффициент плотности жидкости); $\nu \nabla^2 \vec{u}$ – вязкость среды (ν – коэффициент вязкости); $\vec{F}$ – внешние силы, применяемые к жидкости.

Первая версия FDS выпущена в 2000 г. Данная модель широко используется как для разработки противопожарных систем, так и для предсказания распространения пожаров в жилых и производственных помещениях. Причем FDS может быть использована для анализа различных стратегий тушения пожаров, оценки влияния конструкционных материалов на поведение огня и определения зон риска, а также для оценки пожарной безопасности новых зданий и разработки стратегий по улучшению пожарной безопасности в уже существующих объектах. Кроме этого, программа FDS распространяется бесплатно и является общественным достоянием.

Реализация и апробация программных средств

В рамках предыдущих работ по исследуемой тематике разработаны прототип «умного датчика», способный в реальном времени собирать информацию о состоянии производственного объекта, и база данных, в которой, кроме данных с датчиков, содержатся все параметры, необходимые для моделирования эвакуации [9].

Программное обеспечение реализовано с использованием императивного, структурированного, объектно-ориентированного, высокоуровневого языка программирования Delphi в среде Embarcadero RAD Studio 10 Berlin – интегрированной среде разработки, которая предназначена для создания приложений для различных платформ, таких как Windows, macOS, iOS, Android и Linux. С помощью визуального редактора форм разработчики могут создавать пользовательские интерфейсы, настраивая элементы управления. RAD Studio поддерживает несколько языков программирования, включая Delphi, C++ и C#. Это означает, что разработчики могут выбирать наиболее подходящий язык для задач, а также комбинировать их в рамках одного проекта. Кроме того, часть кода, написанная на одном языке, может быть повторно использована в других частях приложения, что позволяет существенно упростить разработку.

При работе с программой необходимо выбрать: конкретный этаж, на котором происходит эвакуация; сотрудников (можно выбрать как всех, так и только конкретных для удобства отображения); дату проведения эвакуации и конкретное помещение. Далее выбирается модель, по которой проводится моделирование эвакуации, так как ранее, помимо индивидуально-поточной, реализована упрощенная аналитическая модель. После нажатия на кнопку «Расчет» необходимо подождать до нескольких минут, в зависимости от условий моделирования. Далее на подложке схемы отобразятся все индивидуальные маршруты работников и теоретическое и реальное время эвакуации.

Описание и сравнение полученных результатов

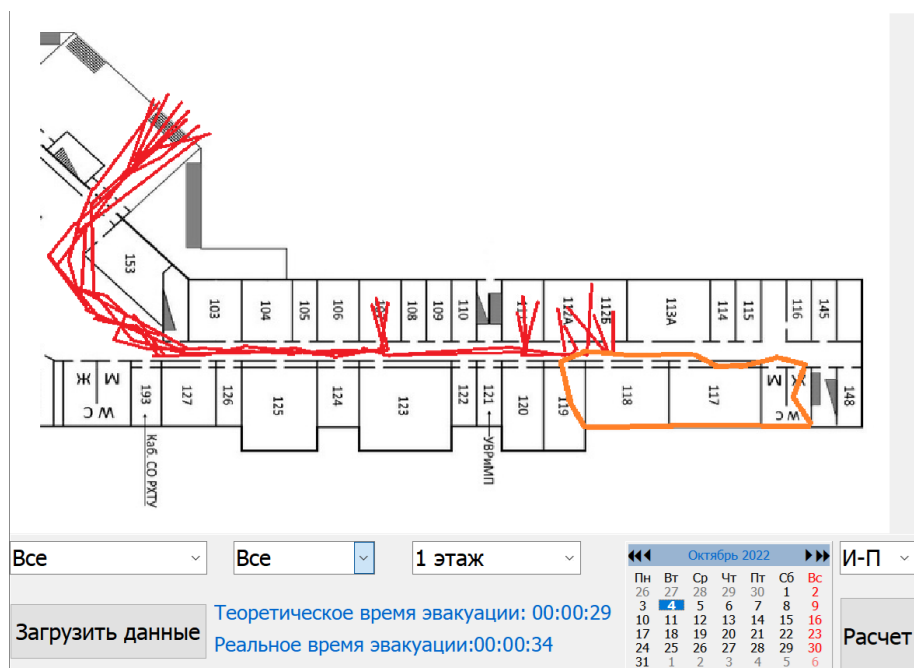
Проведем моделирование эвакуации из помещений 1126, 112а, 111 и 107 (рис. 2). Для этого заранее собраны данные о реальной эвакуации (маршрутах перемещения и времени) с помощью разработанного мобильного приложения, отслеживающего перемещение сотрудников во время эвакуации [9], результаты работы которого представлены на плане. Также для эксперимента проведено моделирование распространения пламени и дыма программным комплексом FDS, результатами которого является 3D-модель распространения огня и дыма в помещении во времени.

Предварительно проводится автоматическая разметка подложки со схемой помещения, поэтому каждый пиксель получает координаты X и Y , а точки, из которых формируется граница трехмерного представления модели пламени исключением координаты Z , переносятся на плоскость для удобства отображения и отмечаются на плане в виде замкнутой линии. Такие границы отображают области поражения на плане и позволяют автоматически анализировать возможное перекрытие маршрутов эвакуации во времени. Моделирование проведено для эвакуации 25 сотрудников, когда пожар начался в 117 помещении.

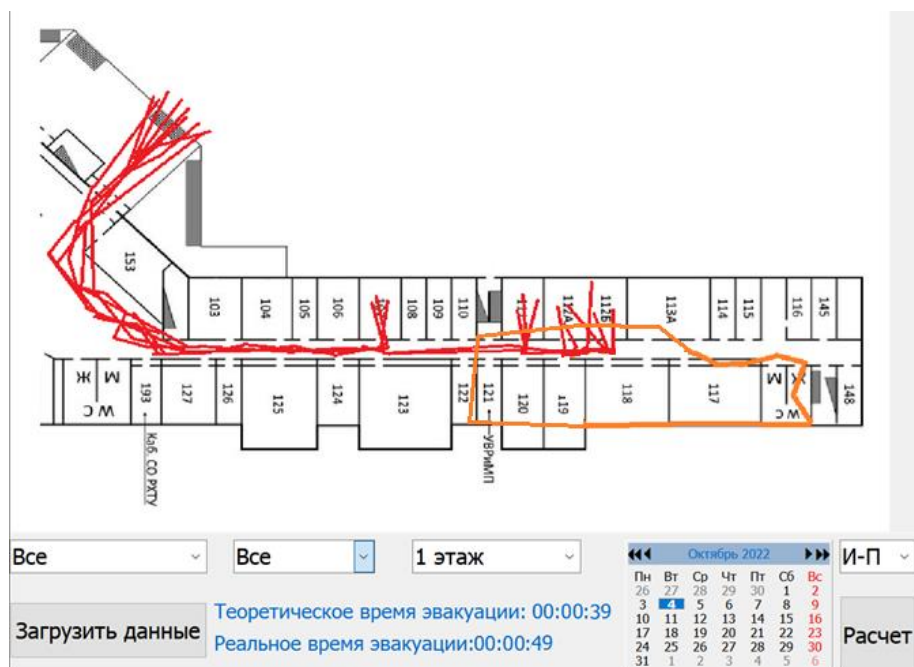
Можно наблюдать, что моделируемое время эвакуации практически не отличается от реального и из технического отчета следует, что простоев и погибших во время такой эвакуации не будет. Число погибших вычисляется по методике вычисления условной вероятности поражения человека [10].

Далее проведены шесть численных экспериментов, данные по которым отображены в сводной табл. 1. Для экспериментов 1 – 3 теоретическое время моделируется на основе индивидуально-поточной модели с учетом распространения пламени и дыма, 4 – 6 – без его учета.

Для случая эвакуации 25 сотрудников и наличия источника пожара в 117 помещении число погибших равняется 0, при расположении источника в помещении 123 время эвакуации растет, так как в дверном проеме между помещениями 112а и 1126 происходит задержка из-за наличия области поражения пламенем. Также из-за этого вероятность смерти последнего эвакуирующего сотрудника будет близка к 100 %. В случае третьего эксперимента область поражения перекрест



а)



б)

Рис. 2. Результаты моделирования для сценариев 1 (а) и 5 (б)

дверной проем между помещениями 106 и 107, расположенный еще ближе к выходу из здания, потому время задержки возрастает и высока вероятность гибели уже двух сотрудников.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования эвакуации

Эксперимент	Время эвакуации		Число эвакуирующихся	Расположение источника пожара	Число погибших
	теоретическое	реальное			
1	00:00:29	00:00:34	25	117	0
2	00:00:35	00:00:42		123	1
3	00:00:45	00:00:51		127	2
4	00:00:27	00:00:34		117	0
5	00:00:33	00:00:42		123	
6	00:00:43	00:00:51		127	

В экспериментах 4 – 6 показательным является то, что время отличается незначительно, но использование только индивидуально-поточной модели ведет к грубой ошибке подсчета числа жертв, так как не учитываются динамически обр-зающиеся преграды на путях эвакуации.

Заключение

Таким образом, с использованием разработанной программы по моделирова-нию эвакуации исследованы различные сценарии развития чрезвычайной ситуа-ции. Результаты исследования могут использоваться для усовершенствования эвакуационной системы объекта.

В текущем виде разработанное программное приложение является эффек-тивным средством для решения учебных и научно-исследовательских задач, например исследования влияния различных факторов на вероятность поведения успешной эвакуации. Для дальнейшего использования в комплексной информа-ционной системе эвакуации необходимо усовершенствовать индивидуально-поточную модель эвакуации с учетом большего варьирования параметров моде-лирования.

Список литературы

1. Lee, H.-Y. A Planning Model for Evacuation in Building / H.-Y. Lee, H.-H. Tseng // International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering. – 2014. – Vol. 8, No. 10. – P. 2937 – 2941.
2. Wan, S. Dynamic Differential Evolution for Emergency Evacuation Optimization / S. Wan // Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8795. – P. 392 – 400.
3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС РФ от 30.06.2009 № 382 в редакции от 12.12.2011. – Текст : электронный. URL : [http://fire-audit.su/d/514375/d/32.prikaz-mchs-rf-ot-30-iyunya-2009 g.pdf/](http://fire-audit.su/d/514375/d/32.prikaz-mchs-rf-ot-30-iyunya-2009-g.pdf) (дата обращения: 20.06.2023).
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производ-ственных объектах (утверждена приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404) // Декларирование пожарной безопасности и оценка пожарного риска : сб. докумен-тов. Серия 19. Вып. 2. Ч. 4. Нормативные правовые документы по оценке пожар-ного риска, методики и примеры. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 288 с.
5. Колодкин, В. М. Программные алгоритмы, реализующие модель движе-ния людских потоков в системе управления эвакуацией людей из здания /

В. М. Колодкин, М. Э. Галиуллин // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 10. – С. 75 – 85. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.75-85

6. Колодкин, В. М. Алгоритмы и модели системы управления эвакуацией людей при пожаре в здании / В. М. Колодкин, Б. В. Чирков // Безопасность в техносфере : X Междунар. конф. (Ижевск, 19 апреля 2016 г.). – Ижевск, 2016. – С. 28 – 43.

7. Чернухин, А. В. Умные датчики и база данных как элементы информационной системы эвакуации / А. В. Чернухин, А. М. Сверчков, Т. В. Савицкая // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 6(229). – С. 154 – 156.

8. Описание модели FDS. – Текст : электронный. URL : http://fds.sitis.ru/docs/FDS6_1_Mathematical_Model.pdf (дата обращения 07.06.2023).

9. Чернухин, А. В. Комплекс программных средств информационной системы по эвакуации персонала предприятия / А. В. Чернухин, А. М. Сверчков // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 1(197). – С. 48 – 50.

10. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : приказ МЧС РФ от 25 марта 2009 г. № 182 в редакции от 09.12.2010. – Текст : электронный. – URL : <https://base.garant.ru/195520/> (дата обращения: 20.06.2023).

The Development of a Software Application for Simulation of Fire Evacuation at a Hazardous Production Facility

A. V. Chernukhin✉, T. V. Savitskaya, A. M. Sverchkov, A. V. Dementienko

*Department of Cybernetics of Chemical Technological Processes,
chernukhin.a.v@muctr.ru; D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russia*

Keywords: evacuation model; flame propagation model; evacuation information system; data collection; software application.

Abstract: The problem of modeling evacuation from industrial facilities is considered. Modern algorithms and models of evacuation, the spread of fire and smoke are described. In the Delphi programming environment, a software application has been developed to simulate the evacuation of employees in the event of an emergency, taking into account the spread of flame and smoke, which implements an individual flow model. Approbation of the software application for various cases of evacuation is presented.

References

1. Lee H.-Y., Tseng H.-H. A Planning Model for Evacuation in Building, *International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering*, 2014, vol. 8, no. 10, pp. 2937-2941.

2. Wan S. Dynamic Differential Evolution for Emergency Evacuation Optimization. *Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8795, pp. 392-400.

3. available at: <http://fire-audit.su/d/514375/d/32.prikaz-mchs-rf-ot-30-iyunya-2009g.pdf/> (accessed 20 June 2023)

4. [The methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities (approved by order of the Russian Emergencies Ministry of July 10, 2009 No. 404)], *Deklarirovaniye pozharnoy bezopasnosti i otsenka pozharnogo riska : sb. dokumentov. Normativnyye pravovyye dokumenty po otsenke pozharnogo riska, metodiki i primery* [Declaration of fire safety and fire risk assessment: a collection of documents. Regulatory legal documents on fire risk assessment, methods and examples], Series 19, Issue 2, Part 4, Moscow: ZAO NTTs PB, 2010, 288 p. (In Russ.)

5. Kolodkin V.M., Galiullin M.E. [Software algorithms that implement the model of the movement of human flows in the control system for the evacuation of people from the building], *Pozharovzryvobezopasnost* [Fire and Explosion Safety], 2019, vol. 25, no. 10, pp. 75-85. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Kolodkin V.M., Chirkov B.V. [Algorithms and models of people evacuation control system in case of fire in a building], *Bezopasnost' v tekhnosfere: X Mezhdunar. konf.* [Security in the Technosphere: X International Conference] (Izhevsk, 19 Apr. 2016), Izhevsk: 2016, pp. 28-43. (In Russ.)

7. Chernukhin A.V., Sverchkov A.M., Savitskaya T.V. [Smart sensors and database as elements of an evacuation information system], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2020, vol. 34, no. 6(229), pp. 154-156. (In Russ., abstract in Eng.)

8. available at: http://fds.sitis.ru/docs/FDS6_1_Mathematical_Model.pdf (accessed 07 June 2023).

9. Chernukhin A.V., Sverchkov A.M. [A complex of software tools for the information system for the evacuation of enterprise personnel], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2018, vol. 32, no. 1(197), pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

10. available at: <https://base.garant.ru/195520> (accessed 07 June 2023).

Entwicklung einer Software-Anwendung für die Modellierung der Evakuierung im Brandfall in einer gefährlichen Industrieanlage

Zusammenfassung: Es ist das Problem der Modellierung der Evakuierung aus Produktionsanlagen betrachtet. Es sind Beschreibungen moderner Algorithmen und Modelle zur Evakuierung, Brand- und Rauchausbreitung gegeben. In der Delphi-Programmierungsumgebung ist eine Softwareanwendung entwickelt, um die Evakuierung von Mitarbeitern im Notfall unter Berücksichtigung der Flammen- und Rauchausbreitung zu simulieren und ein individuelles Strömungsmodell zu implementieren. Es ist die Approbation der Softwareanwendung für verschiedene Evakuierungsfälle vorgestellt.

Élaboration d'une application logicielle pour simuler l'évacuation lors d'un incendie dans une installation de production dangereuse

Résumé: Est examinée la tâche de simulation d'évacuation des installations de production. Sont données des descriptions d'algorithmes et de modèles modernes d'évacuation, de propagation du feu et de fumée. Dans l'environnement de programmation Delphi est élaboré une application logicielle conçue pour modéliser l'évacuation des employés en cas d'urgence en tenant compte de la propagation des flammes et de la fumée, mettant en œuvre un système de flux personnalisé. Est présentée la validation de l'application logicielle pour divers cas d'évacuation.

Авторы: *Чернухин Артём Валерьевич* – аспирант кафедры кибернетики химико-технологических процессов; *Савицкая Татьяна Вадимовна* – доктор технических наук, профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов; *Сверчков Андрей Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетики химико-технологических процессов; *Дементюенко Андрей Владимирович* – ассистент кафедры кибернетики химико-технологических процессов, ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБОГРЕВОМ ТЕПЛИЦ ЭЛЕМЕНТАМИ С ОТКРЫТОЙ СПИРАЛЬЮ

А. А. Хвостов^{1,3}, М. И. Слюсарев², А. А. Журавлев²,
В. К. Битюков³, И. А. Хаустов³, Р. А. Романов^{3✉}

*Кафедра прикладной математики и механики,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (1);
кафедра криогенных машин, установок и электрогазовой техники,
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (2),
кафедра информационных и управляющих систем,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных
технологий», romanov_ra@list.ru (3), Воронеж, Россия*

Ключевые слова: защищенный грунт; конвекция; моделирование; нагрев спирали; нестационарный теплообмен; температурное поле; теплица; теплообмен.

Аннотация: Представлена методика оценки погрешности расчета температуры проводника в ходе его нагрева при прохождении через него электрического тока с учетом температурной зависимости сопротивления проводника. На основе тепловых балансовых соотношений получены зависимости для оценки динамики погрешностей расчета температуры открытой спирали нагревательного элемента в процессе нагрева. Математическая модель нагрева дополнена зависимостью сопротивления проводника от температуры, что позволило оценить погрешность расчета в установившемся режиме и в динамике. Вычислительные эксперименты показали снижение абсолютной и относительной погрешностей расчетов при увеличении диаметра проводника и скорости его обдува воздухом.

Введение

Агропромышленный комплекс относится к числу приоритетных отраслей народного хозяйства. В 2012 году Правительством РФ принята Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы (от 14 июля 2012 № 717) [1]. Одним из направлений данной программы является подпрограмма «Развитие подотрасли растениеводства, переработки и реализации растениеводства», предусматривающая проведение мероприятия «Развитие производства продукции растениеводства в защищенном грунте». Данное мероприятие должно быть направлено на разработку новых ресурсосберегающих технологий выращивания тепличных овощных культур, а также на разработку новых и усовершенствование существующих конструкций теплиц, технологического оборудования и систем обеспечения микроклимата теплиц и грибоводческих комплексов для повышения урожайности и качества овощей [1, 2].

Теплицы, являясь наиболее практичным видом культивационного сооружения, гарантируют получение стабильно высоких урожаев в силу их малой зависи-

мости от погодных условий и возможности создания оптимального искусственного микроклимата, управления питанием растений в период вегетации культур [2, 3].

Фактором, сдерживающим развитие тепличных хозяйств, являются значительные затраты на создание оптимального микроклимата в теплицах, составляющие свыше 40 % в себестоимости продукции, выращенной в условиях тепличного хозяйства. Кроме этого, замедляющим фактором является продолжительный период низких температур на территории РФ, а также рост цен на энергоресурсы.

В этой связи актуальным направлением является разработка современных энергосберегающих технологий и устройств их реализации, обеспечивающих создание оптимального микроклимата в теплицах, к числу основных показателей которого относят температуру воздуха и грунта, их влажность, освещенность, движение воздуха и его состав. Все эти параметры равнозначны, незаменимы и взаимосвязано воздействуют на возделываемую агрокультуру. Оптимальный уровень микроклимата в теплице обеспечивает наилучшие условия для роста и развития сельскохозяйственных культур [3]. Наиболее важным параметром микроклимата в теплице является температура воздуха и грунта.

Теплица, как объект автоматического управления температурным режимом, характеризуется нестационарностью и распределенностью параметров и воздействием возмущений в виде изменения степени загрязнения ограждений, нарастания объема листостебельной массы и пр. В то же время агротехнические нормы предписывают высокую точность поддержания температуры (1 °С) воздуха и почвы, а также ее адаптацию к изменяющимся фазам развития сельхозкультуры и параметрам внешней среды (смена времени суток и года, изменение солнечной активности и пр.).

Наиболее распространенные отопительные системы с горячей водой, а также системы обогрева на базе угольных и газовых печей не всегда могут быть реализованы в географически удаленных зонах, характеризующихся отсутствием газораспределительных сетей и развитой автотранспортной инфраструктуры для доставки углеводородного сырья, в которых электричество является единственным доступным стабильным источником энергии.

В этой связи более перспективным является использование электротехнических систем подогрева воздуха и грунта, выполненных на базе электронагревательных элементов в виде открытой или закрытой спирали [4]. Сравнительный анализ традиционных систем обогрева теплиц с электротехническими системами показал перспективность и эффективность последних [5].

Существующие расчеты геометрии и режима работы нагревательных элементов, как правило, осуществляются без учета влияния температуры проводника на его сопротивление с использованием значения номинального сопротивления при некоторой «рабочей» температуре [6]. В ряде случаев осуществляется оценка работы проектируемой системы в различных температурных режимах с использованием табличных значений сопротивлений или расчетов сопротивлений по зависимостям, связывающим их с температурой [7, 8]. Действительно, при обогреве больших объемов воздух, использовании конвективного отвода тепла от проводника или в случае незначительных отклонений температуры включения от рабочей влиянием температуры можно пренебречь. Однако в случае нагрева сравнительно небольших объемов (когда может осуществляться локальный резкий нагрев проводника), низкой интенсивности конвекции около проводника, существенной зависимости сопротивления проводника от температуры и т.д. влияние температуры проводника на его сопротивление будет существенным и приведет к росту погрешности расчетов. В этом случае при расчетах и проектировании нагревательных элементов, а также при оценке их динамических характеристик необходимо использовать модель нагрева, учитывающую зависимость сопротивления проводника от температуры.

Методика

Рассмотрим открытую спираль в виде однородного проводника, по которому протекает электрический ток [6, 9]. Количество теплоты, которое выделяется в проводнике за счет прохождения электрического тока, расходуется на нагрев проводника и отведение с поверхности конвекцией (излучением при этом пренебрегаем)

$$I^2 R dt = G c d(T - T_0) + \alpha F (T - T_0) dt, \quad (1)$$

где I – сила тока, проходящего по проводнику, А; R – сопротивление проводника, Ом; G – масса проводника, кг; c – удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности теплообмена проводника, м²; T – температура проводника, °С; T_0 – начальная температура проводника (равна температуре воздуха, окружающего проводник), °С; t – время, с.

Разделим правую и левую части (1) на dt и запишем относительно неизвестного $(T - T_0)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(T - T_0)}{dt} + \frac{\alpha F}{G c} (T - T_0) = \frac{I^2 R}{G c} \\ T(0) = T_0 \end{array} \right. \quad (2)$$

Полученное дифференциальное уравнение описывает нагрев проводника при постоянном сопротивлении без учета температурной поправки. Введем дополнительно зависимость сопротивления от температуры [6]

$$R = R_0 (1 + \alpha^* (T - T_0)), \quad (3)$$

где R_0 – сопротивление проводника при температуре T_0 , Ом; α^* – температурный коэффициент сопротивления, К⁻¹.

Тогда перепишем уравнение (2) в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(T - T_0)}{dt} + \frac{\alpha F}{G c} (T - T_0) = \frac{I^2 R_0 (1 + \alpha^* (T - T_0))}{G c} \\ T(0) = T_0 \end{array} \right. \quad (4)$$

Решение (4) будет следующим [9]:

$$T(t) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{G c} t} \right). \quad (5)$$

При $\alpha^* = 0$ (5) сводится к зависимости с постоянным сопротивлением

$$\tilde{T}(t) = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{G c} t} \right). \quad (6)$$

В установившемся режиме оценим температуру проводника как $\lim_{t \rightarrow \infty} T(t)$ для (5)

$$T_{уст} = \lim_{t \rightarrow \infty} T(t) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}, \quad (7)$$

и $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{T}(t)$ для (6)

$$\tilde{T}_{уст} = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{T}(t) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F}. \quad (8)$$

Для оценки средней погрешности расчета температуры спирали без учета температурной зависимости сопротивления проводника от температуры рассчитаем среднюю температуру спирали за время нагрева τ без учета температурной поправки [10]

$$\bar{\tilde{T}}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left[T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right) \right] dt = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{1}{\tau} \frac{I^2 R Gc \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right)}{\alpha^2 F^2} \quad (9)$$

и с ее учетом

$$\begin{aligned} \bar{T}(\tau) &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left[T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau} \right) \right] dt = \\ &= T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} - \frac{1}{\tau} \frac{I^2 R Gc \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau} \right)}{(\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответствующие значения в установившемся режиме оценим как $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{\tilde{T}}(\tau)$ для (9)

$$\tilde{T}_{уст} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \tilde{T}(\tau) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F}, \quad (11)$$

что соответствует (8), и $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{T}(\tau)$ для (12)

$$\bar{T}_{уст} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{T}(\tau) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}, \quad (12)$$

что соответствует (7).

Полученные формулы (5) – (12) позволяют вывести зависимости для оценок абсолютной погрешности за время нагрева τ

$$\Delta T(\tau) = T(\tau) - \tilde{T}(\tau) = \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau} \right) - \frac{I^2 R}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right); \quad (13)$$

средней абсолютной погрешности за время нагрева τ

$$\Delta \bar{T}(\tau) = \left(\frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \right) + \frac{I^2 R Gc}{\tau} \left[\frac{1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau}}{(\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*)^2} - \frac{1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau}}{\alpha^2 F^2} \right]; \quad (14)$$

а также абсолютной и относительной погрешности в установившемся режиме:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{абс}} = \left| \lim_{\tau \rightarrow \infty} \Delta \bar{T}(\tau) \right| = \left| \frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \right|; \quad (15)$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{отн}} = \frac{\left| \frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \right|}{\bar{T}_{\text{уст}}} 100. \quad (16)$$

По формулам (13) – (16) можно оценить возможную погрешность при расчете, проектировании или оценке статических и динамических характеристик систем управления нагревательными элементами с открытой спиралью.

Коэффициент теплоотдачи α , входящий в уравнения динамики нагрева (5) и (6), может быть определен по критерию Нуссельта Nu

$$Nu = \frac{\alpha d_{\text{сп}}}{\lambda_{\text{сп}}}, \quad (17)$$

где $d_{\text{сп}}$ – диаметр спирали, м; $\lambda_{\text{сп}}$ – коэффициент теплопроводности материала спирали, Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта в свою очередь связан с критериями Рейнольдса Re , Грасгофа Gr и Прандтля Pr [11, 12]:

$$Re = \frac{\vartheta_B d_{\text{сп}} \rho_B}{\mu_B}, \quad (18)$$

где ϑ_B – скорость движения воздуха, м/с; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; μ_B – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

$$Gr = \frac{g d_{\text{сп}}^3 \rho_B^2 \beta_B}{\mu_B^2} \Delta t, \quad (19)$$

где β_B – коэффициент температурного расширения воздуха, К⁻¹; Δt – температурный напор между поверхностью спирали и воздухом, °С;

$$Pr = \frac{\mu_B c_B}{\lambda_B}, \quad (20)$$

где c_B – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·м³); λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Теплообмен между нагретой спиралью и окружающим ее воздухом может осуществляться в условиях как естественной, так и вынужденной конвекции.

При естественной конвекции перемещение отдельных объемов воздуха происходит исключительно вследствие различия температур в его разных местах и вызванного этим различия плотностей. В этом случае критерием Рейнольдса допустимо пренебречь и критерий Нуссельта Nu связан только с критериями Грасгофа Gr и Прандтля Pr .

По данным академика М. А. Михеева [12], в условиях естественной конвекции возле тонких нагретых проволок возникает пленочный или переходной от пленочного к ламинарному режимы течения теплоносителя.

Для таких случаев критерий Нуссельта может быть вычислен как

$$Nu = \begin{cases} 0,5, & \text{при } Gr \cdot Pr < 10^{-3}; \\ 1,18Gr^{0,125}Pr^{0,125}, & \text{при } Gr \cdot Pr = 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2. \end{cases} \quad (21)$$

В случае вынужденной конвекции интенсивность принудительного движения теплоносителя преобладает над интенсивностью его свободного движения. В этой связи критерий Нуссельта зависит от критерия Рейнольдса. Критерием Грасгофа допустимо пренебречь.

В условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании воздушного потока поверхности цилиндра или трубы критерий Нуссельта может быть вычислен как [12]:

$$Nu = \begin{cases} 0,76Re^{0,4}Pr^{0,37}, & \text{при } 1 < Re < 40; \\ 0,52Re^{0,5}Pr^{0,37}, & \text{при } 40 \leq Re < 10^3; \\ 0,26Re^{0,6}Pr^{0,37}, & \text{при } 10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5; \\ 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}, & \text{при } 2 \cdot 10^5 < Re < 10^7. \end{cases} \quad (22)$$

Располагая значением критерия Нуссельта, из формулы (17) можно определить значение коэффициента теплоотдачи для данных условий

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_{сп}}{d_{сп}}. \quad (23)$$

Экспериментальная часть

Проведем серию вычислительных экспериментов на примере конвективного теплообмена между воздухом и нагретой открытой спирали при протекании по ней электрического тока [9, 10].

Исследуем зависимости (13) – (16) на предмет чувствительности ошибки расчетов без учета температуры к изменению параметров, входящих в (13) – (16) и которые могут варьироваться в процессе проектирования или расчета нагревательного элемента.

Как видно из (13) – (16), влияние на погрешность расчетов оказывают параметры $I, F, G, C, \alpha, \alpha^*, R_0$. Поскольку величины I, F, G, C взаимосвязаны функционально и определяются в большей степени геометрией проводника, их можно охарактеризовать диаметром проводника, через изменение которого произойдет изменение перечисленных выше параметров (13) – (16). Коэффициент теплоотдачи α определяется в основном расходом воздуха при обдуве и площадью поверхности теплообмена, а α^*, R_0 – типом материала. Таким образом, целесообразно провести исследование влияния диаметра проводника $d_{сп}$, расхода воздуха (нагреваемой среды) V и типа материала (α^*, R_0).

В качестве объекта моделирования принята электрическая спираль, изготовленная из никель-хромового сплава нихром Х20Н80, теплофизические характеристики которого представлены ниже.

Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом/(мм ² ·м)	1,1
Плотность $\rho_{сп}$, кг/м ³	8300
Удельная теплоемкость $c_{сп}$, Дж/(кг·К)	440
Температурный коэффициент сопротивления α^* , К ⁻¹	0,0002

Приведем теплофизические свойства воздуха (при температуре 20 °С).

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{в}}$, Вт/(м·К)	0,0305
Плотность $\rho_{\text{в}}$, кг/м ³	1,5
Динамическая вязкость $\mu_{\text{в}}$, Па·с	0,000021
Коэффициент температурного расширения $\beta_{\text{в}}$, К ⁻¹	0,00343
Удельная теплоемкость $c_{\text{в}}$, Дж/(кг·м ³)	1009

Эксперимент № 1. Оценка влияния температурной зависимости сопротивления на погрешность вычисления температуры спирали.

Диаметр спирали 0,8 мм. Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока, 1000 Вт (при напряжении $U = 220$ В). Начальная температура спирали и температура окружающего воздуха принята $T_0 = 20$ °С. Скорость движения воздуха $\vartheta_{\text{в}} = 1,0$ м/с.

По известным соотношениям [6] вычислены параметры нагревательного элемента: сила тока I , электрическое сопротивление R_0 (при $T_0 = 20$ °С), длина спирали L , масса G и площадь поверхности теплообмена F .

Сила тока I , А	4,545
Электрическое сопротивление R_0 , Ом	48,4
Площадь поверхности теплообмена F , м ²	0,055
Масса проводника G , кг	0,092
Длина L , м	22,1

Критерии Рейнольдса Re , Прандтля Pr и Нуссельта Nu рассчитаны по формулам (18), (19) и (20) соответственно. Значение коэффициента теплоотдачи α вычислено по формуле (26). Температура в установившемся режиме с учетом и без учета температурной зависимости сопротивления рассчитаны по формулам (7) и (8) соответственно. Абсолютная и относительная погрешности – по формулам (15) и (16). Приведем ниже результаты вычислительного *эксперимента № 1*.

Критерии:

Рейнольдса Re	56,87
Прандтля Pr	0,7
Нуссельта Nu	3,43
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	130,88
Температура в установившемся режиме, °С:	
с учетом температурной зависимости сопротивления $T_{\text{уст}}$	161,48
без учета температурной зависимости сопротивления $\tilde{T}_{\text{уст}}$	157,58

Погрешность:

абсолютная $\bar{\varepsilon}_{\text{абс}}$, °С	3,97
относительная $\bar{\varepsilon}_{\text{отн}}$, %	2,5

На рис. 1, 2 представлены результаты моделирования процесса нагрева открытой спирали.

Расчетная погрешность расчета температуры нагрева без учета температурной поправки в установившемся режиме – 3,97 °С, что составило относительно предельного значения (161,48 °С) 2,5 %.

Эксперимент № 2. Оценка влияния диаметра нагревательного элемента на погрешность вычисления температуры спирали.

Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока, 1000 Вт (при напряжении $U = 220$ В). Начальная температура спирали и темпера-

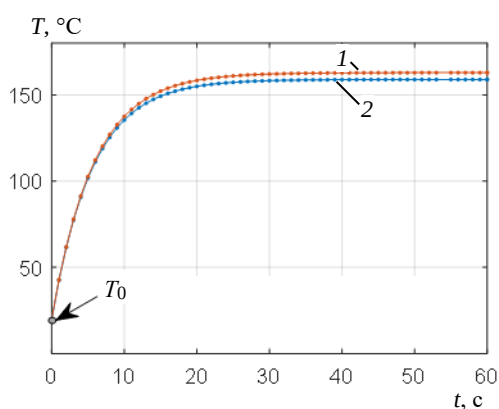


Рис. 1. Изменение температуры спирали при ее нагреве с температурной поправкой (1) и без нее (2)

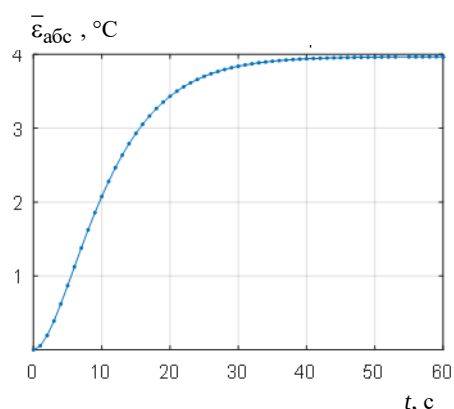


Рис. 2. Изменение абсолютной погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

тура окружающего воздуха принята $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость движения воздуха $\vartheta = 1,0\text{ м/с}$. Диаметр спирали $d_{\text{сп}}$ варьировали в диапазоне от 0,6 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм.

По известным соотношениям [6] для заданного диаметра нагревательного элемента вычислены те же параметры, что и в *эксперименте № 1*, а также площадь поперечного сечения S (табл. 1).

Критерии Рейнольдса Re , Прандтля Pr и Нуссельта Nu рассчитаны по формулам (21), (23) и (25) соответственно. Значение коэффициента теплоотдачи α вычислено по формуле (23). Температура в установившемся режиме с учетом и без учета температурной зависимости сопротивления рассчитаны по формулам (7) и (8) соответственно. Абсолютная и относительная погрешности – по формулам (15) и (16). Результаты вычислительного *эксперимента № 2* представлены в табл. 2 и на рис. 3, 4.

Эксперимент № 3. Оценка влияния скорости воздуха на погрешность вычисления температуры спирали.

Таблица 1

Параметры нагревательного элемента

Параметр	Диаметр нагревательного элемента $d_{\text{сп}}$, мм				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Сила тока I , А	4,54				
Электрическое сопротивление R_0 , Ом	48,4				
Площадь поперечного сечения S , мм ²	0,283	0,385	0,502	0,636	0,785
Длина L , м	12,43	16,92	22,11	27,98	34,54
Масса G , кг	0,029	0,054	0,092	0,147	0,225
Площадь поверхности теплообмена F , м ²	0,023	0,037	0,055	0,079	0,108

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента № 2

Название параметра	Диаметр нагревательного элемента $d_{\text{сп}}$, мм				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Критерии:					
Рейнольдса Re	42,65	49,76	56,87	63,98	71,09
Прандтля Pr	0,7				
Нуссельта Nu	2,97	3,21	3,43	3,64	3,84
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	151,14	139,92	130,89	123,4	117,07
Температура в установившемся ре- жиме, °С:					
с учетом температурной зависи- мости сопротивления $T_{\text{уст}}$	329,90	222,92	162,54	125,56	100,37
без учета температурной зависи- мости сопротивления $\tilde{T}_{\text{уст}}$	307,62	213,12	157,63	122,56	98,78
Погрешности:					
абсолютная $\bar{\varepsilon}_{\text{абс}}$, °С	22,3	9,8	4,9	2,7	1,6
относительная $\bar{\varepsilon}_{\text{отн}}$, %	7,2	4,6	3,1	2,2	1,6

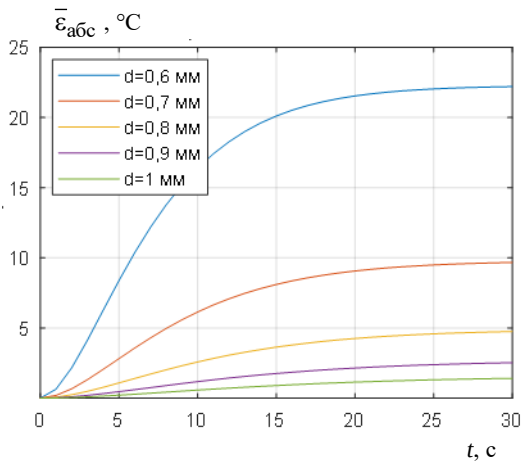


Рис. 3. Влияние диаметра спирали на изменение абсолютной погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

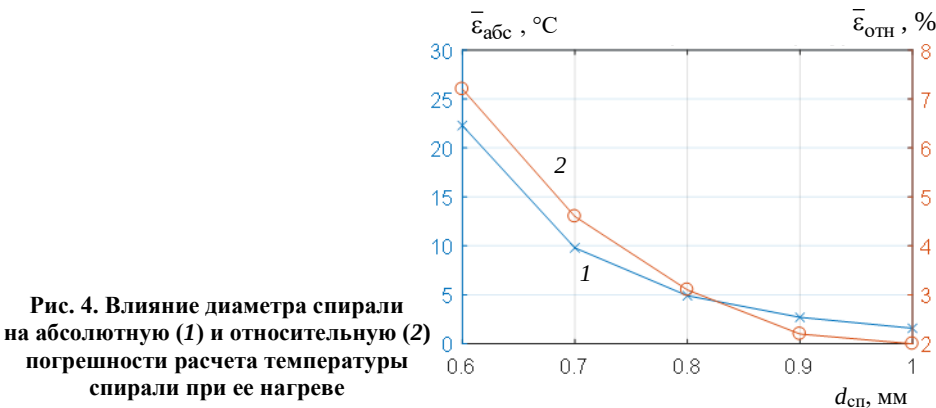


Рис. 4. Влияние диаметра спирали на абсолютную (1) и относительную (2) погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока 1000 Вт (при напряжении $U = 220$ В). Начальная температура спирали и температура окружающего воздуха приняты $T_0 = 20$ °С. Диаметр спирали 0,8 мм. Скорость движения воздуха $\vartheta_{\text{в}}$ варьировали в интервале от 0,5 до 2,5 м/с с шагом 0,5 м/с.

Параметры нагревательного элемента для данных условий соответствуют параметрам вычислительного эксперимента № 1 (см. с. 225).

Критерии Рейнольдса Re , Прандтля Pt и Нуссельта Nu рассчитаны по формулам (21), (23) и (25) соответственно. Значение коэффициента теплоотдачи α вычислено по формуле (26). Температура в установившемся режиме с учетом и без учета температурной зависимости сопротивления рассчитаны по формулам (7) и (8) соответственно. Абсолютная и относительная погрешности – по формулам (15) и (16). Результаты вычислительного эксперимента № 3 представлены в табл. 3 и рис. 5, 6.

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента № 3

Название параметра	Скорость движения воздуха $\vartheta_{\text{в}}$, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Критерии:					
Рейнольдса Re	28,43	56,87	85,31	113,74	142,18
Прандтля Pt	0,7				
Нуссельта Nu	2,43	3,43	4,20	4,86	5,43
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	92,55	130,88	160,30	185,10	206,95
Температура в установившемся режиме, °С:					
с учетом температурной зависимости сопротивления $T_{\text{уст}}$	222,32	161,48	134,92	119,22	108,56
без учета температурной зависимости сопротивления $\tilde{T}_{\text{уст}}$	214,58	157,58	132,34	117,29	107,02
Погрешности:					
абсолютная $\bar{\varepsilon}_{\text{абс}}$, °С	8	3,97	2,6	1,97	1,6
относительная $\bar{\varepsilon}_{\text{отн}}$, %	4,1	2,9	2,3	2	1,8

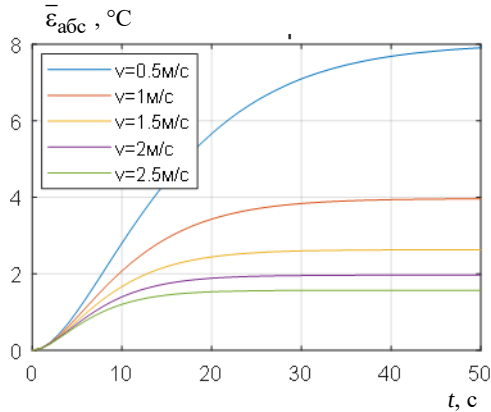
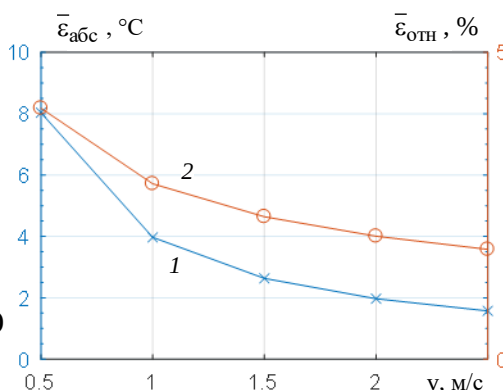


Рис. 5. Влияние скорости воздуха на изменение абсолютной погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

Рис. 6. Влияние скорости воздуха на абсолютную (1) и относительную (2) погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве



Результаты и их обсуждение

Как видно из представленных на рис. 1, 2 данных и по результатам вычислительного эксперимента № 1 (см. с. 225), в процессе нагрева погрешность расчетов без учета температурной зависимости сопротивления проводника для заданных условий нагрева начинает увеличиваться, принимая по истечении некоторого времени постоянное значение.

По данным таблицы 2 и рис. 3, 4 можно сказать, что с увеличением диаметра спирали относительная и абсолютная ошибки расчетов в установившемся режиме снижаются, то есть при расчете температурного режима тонких спиралей следует учитывать температурный коэффициент сопротивления и для оценки динамики нагрева использовать формулу (5). Расчет по формуле без учета температурной поправки приведет к существенным погрешностям. Для относительно толстых спиралей (определяется также материалом спирали) зависимость сопротивления от температуры можно не учитывать.

Результаты, представленные в табл. 3 и рис. 5, 6, показывают, что с увеличением скорости воздуха погрешность расчета в установившемся режиме снижается. Таким образом, в условиях активного конвективного теплообмена с окружающей средой температурной поправкой можно пренебречь, однако в условиях низкой интенсивности теплообмена погрешности расчетов без учета температурной поправки могут привести к существенным погрешностям.

Заключение

Полученные аналитические зависимости и результаты моделирования показали, что введение температурной поправки в ряде случаев позволяет существенно снизить погрешность расчетов. Прогноз возможных погрешностей по зависимостям (13) – (16) позволяет оценить целесообразность введения поправки для конкретных расчетных задач. Представленные зависимости позволяют учитывать влияние режима обдува, типа материала и геометрию спирали на погрешность расчетов. Это позволит оценить необходимость температурной поправки в случаях, когда критично время нагрева, а также для оценки динамических свойств объекта управления при синтезе систем управления нагревательными элементами.

Список литературы

1. О государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы : Постановление от 14 июля 2012 г. № 717. – Текст: электронный. – 127 с. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/post717-2012.pdf> (дата обращения: 10.02.2024).
2. Гиш, Р. А. Модернизация и совершенствование управления параметрами микроклимата – основа теплиц V поколения / Р. А. Гиш, Е. Н. Карпенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 123. – С. 1929 – 1951. doi: 10.21515/1990-4665-123-129
3. Mukazhanov, Y. Substantiation of Parameters of Microclimate in Greenhouses / Y. Mukazhanov, Z. Zhiyembayev, A. Shaltabayev, Y. Telebayev, C. Alimbayev // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, SGEM2017 Conference Proceedings (Albena, Bulgaria, 29 June – 5 July, 2017), – 2017. – Vol. 17, Is. 62. – P. 765 – 770. doi: 10.5593/sgem2017/62/S27.097
4. Шелехов, И. Ю. Оценка эффективности использования различных методов обогрева теплиц / И. Ю. Шелехов, А. Ю. Сидельникова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2013. – № 1(4). – С. 138 – 142.
5. Соболев, А. В. Эффективность регулирования микроклимата в теплицах с помощью электричества / А. В. Соболев // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 2(89). – С. 154 – 156.
6. Струпинский, М. Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, А. Б. Кувалдин. – М. : Инфра-Инженерия, 2015. – 328 с.
7. Results of Simulation and Physical Modeling of the Computerized Monitoring and Control System for Greenhouse Microclimate Parameters / I. S. Laktionov, O. V. Vovna, A. A. Zori, V. A. Lebedev // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2018. – Vol. 11, No. 1. – P. 1178 – 5608. doi: 10.21307/ijssis-2018-017
8. Vladyskin, I. Mathematical Model of Temperature Field in a Greenhouse / I. Vladyskin, V. Loginov, O. Kochurova // Yale Review of Education and Science. – 2015. – Vol. VI, No. 1(16). – P. 157 – 164.
9. Моделирование нагрева однородного электрического проводника протекающим током / А. А. Хвостов, А. А. Журавлев, Д. И. Целюк, Е. А. Журавлев // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы : сб. материалов Междунар. науч.-практ. межведомственной конф. – Воронеж, 2016. – С. 328 – 329.
10. Оценка температурной погрешности при моделировании нестационарного теплового режима нагрева открытой спирали нагревательного элемента / А. И. Сумин, А. А. Хвостов, А. А. Журавлев, В. В. Синюков // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2018. – № 1. – С. 108 – 117.
11. Остриков, А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств : учеб. пособие / под ред. А. Н. Острикова. – СПб. : ГИОРД, 2012. – 616 с.
12. Болгарский, А. В. Термодинамика и теплопередача : учеб. для вузов / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – Изд. 2-е, переб. и доп. – М. : Высшая школа, 1975. – 495 с.

Temperature Error Estimation when Designing Greenhouse Heating Control Systems with Open Spiral

A. A. Khvostov^{1,3}, M. I. Slyusarev², A. A. Zhuravlev²,
V. K. Bitukov³, I. A. Khaustov³, R. A. Romanov³✉

Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (1);
Department of Cryogenic Machines, Installations and Electric Gas Equipment,
N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy (2);
Department of Information and Control Systems, Voronezh State University
of Engineering Technologies, romanov_ra@list.ru (3); Voronezh, Russia

Keywords: protected soil; convection; modeling; spiral heating; unsteady heat exchange; temperature field; greenhouse; heat exchange.

Abstract: The paper presents a method for assessing the error in calculating the temperature of a conductor during its heating when an electric current passes through it, taking into account the temperature dependence of the conductor resistance. Based on thermal balance relationships, dependencies were obtained to estimate the dynamics of errors in calculating the temperature of the open spiral of the heating element during the heating process. The mathematical model of heating was supplemented with the dependence of the conductor resistance on temperature, which made it possible to estimate the calculation error in steady state and in dynamics. Computational experiments have shown a decrease in the absolute and relative errors of calculations with an increase in the diameter of the conductor and the speed of air blowing.

References

1. Gosudarstvennaya programma razvitiya sel'skogo hozyajstva i regulirovaniya rynkov sel'skohozyajstvennoj produkcii, syr'ya i prodovol'stviya na 2013-2020 gody. [The State Program for the development of agriculture and regulation of agricultural products, raw materials and food markets for 2013-2020], available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/post717-2012.pdf> (accessed 10 February 2024).
2. Gish R.A., Karpenko E.N. [Modernization and improvement of microclimate parameter control is the basis of V generation greenhouses], *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2016, no. 123, pp. 1929-1951. doi: 10.21515/1990-4665-123-129 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Mukazhanov Y., Zhiyembayev Z., Shaltabayev A., Telebayev Y., Alimbayev C. Substantiation of Parameters of Microclimate in Greenhouses, *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, SGEM2017 Conference Proceedings* (Albena, Bulgaria, 29 June – 5 July, 2017), 2017, vol. 17, is. 62, pp. 765-770. doi: 10.5593/sgem2017/62/S27.097
4. Shelekhov I.Yu., Sidel'nikova A.Yu. [Efficiency assessment of using various methods of greenhouse heating], *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost* [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate], 2013, no. 1(4), pp. 138-142 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Sobolev A.V. [The effectiveness of regulating the microclimate in greenhouses using electricity], *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2014, no. 2(89), pp. 154-156. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Strupinskij M.L., Hrenkov N.N., Kuvaldin A.B. *Proektirovanie i ekspluatatsiya sistem elektricheskogo obogreva v neftegazovoj otrasli* [Engineering and maintenance of electric heating systems in the oil and gas industry], Moscow, Infra-Inzheneriya, 2015, 328 p. (In Russ.)
7. Laktionov I.S., Vovna O.V., Zori A.A., Lebedev V.A. Results of Simulation and Physical Modeling of the Computerized Monitoring and Control System for Greenhouse Microclimate Parameters, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 1178-5608. doi: 10.21307/ijssis-2018-017
8. Vladykin I., Loginov V., Kochurova O. Mathematical Model of Temperature Field in a Greenhouse, *Yale review of education and science*, 2015, vol. VI, no. 1(16), pp. 157-164.
9. Hvostov A.A., Zhuravlev A.A., Celyuk D.I., Zhuravlev E.A. *Tekhnika i bezopasnost' ob"ektov ugovolno-ispolnitel'noj sistemy : sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy mezhvedomstvennoj konferencii* [Equipment and security of the objects of the penitentiary system: collection of materials of the International Scientific and Practical Interdepartmental Conference], Voronezh, 2016, pp. 328-329. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Sumin A.I., Hvostov A.A., Zhuravlev A.A., Sinyukov V.V. [Estimation of temperature error in modeling of unsteady thermal mode of heating of an open heating element spiral], *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii* [Bulletin of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service], 2018, no. 1, pp. 108-117. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Ostrikov A.N. *Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv* [Processes and apparatuses of food production], St. Petersburg, GIOR, 2012, 616 p. (In Russ.)
12. Bolgarskij A.V., Muhachev G.A., Shchukin V.K. *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer], Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 495 p. (In Russ.)

Abschätzung von Temperaturfehlern bei der Planung von Regelsystemen für Gewächshausheizungen mit offenen Spiralelementen

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Abschätzung des Fehlers bei der Berechnung der Temperatur des Leiters während seiner Erwärmung vorgestellt, wenn der elektrische Strom durch ihn fließt, wobei die Temperaturabhängigkeit des Leiterwiderstands berücksichtigt wird. Basierend auf thermischen Gleichgewichtsbeziehungen sind Abhängigkeiten ermittelt worden, um die Dynamik von Fehlern bei der Berechnung der Temperatur der offenen Spirale des Heizelements während des Heizvorgangs abzuschätzen. Das mathematische Modell der Erwärmung ist durch die Abhängigkeit des Leiterwiderstandes von der Temperatur ergänzt, was die Abschätzung des Berechnungsfehlers im stationären Modus und in der Dynamik ermöglicht. Computereperimente haben gezeigt, dass die absoluten und relativen Berechnungsfehler mit zunehmendem Durchmesser des Leiters und der Geschwindigkeit des Anblasens mit Luft abnehmen.

Estimation de l'erreur de température dans la conception des systèmes de commande de chauffage des serres avec des éléments à spirale ouverte

Résumé: Est présentée une méthode d'estimation de l'erreur de calcul de la température du conducteur pendant son chauffage lors du passage d'un courant électrique en tenant compte de la dépendance en température de la résistance du conducteur. A la base des rapports de bilan thermique, sont obtenues les dépendances pour évaluer la dynamique des erreurs de calcul de la température de la spirale ouverte de l'élément chauffant pendant le processus de chauffage. Le modèle mathématique de chauffage est complété par la dépendance de la résistance du conducteur à la température, ce qui a permis d'estimer l'erreur de calcul en régime stable et en dynamique. Des expériences de calcul ont montré une diminution des erreurs absolues et relatives des calculs avec une augmentation du diamètre du conducteur et de sa vitesse de soufflage d'air.

Авторы: *Хвостов Анатолий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры информационных и управляющих систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия; *Слюсарев Михаил Иванович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры криогенных машин, установок и электрогазовой техники; *Журавлев Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры математики, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия; *Битюков Виталий Ксенофонович* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; *Хаустов Игорь Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем; *Романов Роман Александрович* – старший преподаватель кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия.

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Ю. С. Шевнина✉

*Кафедра корпоративных информационных технологий и систем,
yusm@rambler.ru; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники», Москва, Россия*

Ключевые слова: автоматизация выходного контроля качества; выходной контроль качества; контур управления; система технического зрения; управление технической системой.

Аннотация: Рассмотрены подходы к управлению технической системой выходного контроля качества выпускаемой продукции с использованием методов искусственного интеллекта. Одна из составных частей система выходного контроля качества – система технического зрения, позволяющая проводить визуальный осмотр выпускаемых изделий. Точность работы такой системы зависит от качества получаемых изображений, основным показателем которого является четкость. Рассмотрены особенности управления технической системой выходного контроля качества, определена основная цель управления – получение изображения заданной четкости. Управление положением камеры и внешними параметрами (освещенностью, скоростью движения конвейерной ленты и др.) осуществляется нейронной сетью. Показаны основные этапы ее обучения и приведена оценка эффективности ее использования. Предложенное решение позволяет проводить выходной контроль качества выпускаемой продукции с высокой точностью без использования ручной настройки или доводки исполнительного оборудования и может быть использовано в различных предметных областях.

Введение

Выходной контроль качества выпускаемой продукции остается актуальным и важным процессом для любого производственного предприятия. Данный вид контроля позволяет убедиться, что продукция соответствует установленным стандартам качества и безопасности перед тем, как она поступит к потребителю [1]. В настоящее время широкое распространение для автоматизации выходного контроля качества выпускаемой продукции получили системы технического зрения, состоящие из производственной камеры высокого разрешения и увеличения и программного обеспечения для последующей обработки изображений (рис. 1). Кроме того, указанные системы позволяют не только определять дефекты выпускаемой продукции, но и сохранять данные о них и состоянии производственной среды в базу знаний с целью последующего анализа и выявления причин возникновения дефектов [2, 3].

Однако точность определения дефектов при таком подходе в значительной степени зависит от качества получаемого изображения исследуемого изделия. Основным показателем качества изображения является четкость – степень полноты воспроизведения мелких деталей и резкость контуров исследуемого объекта.

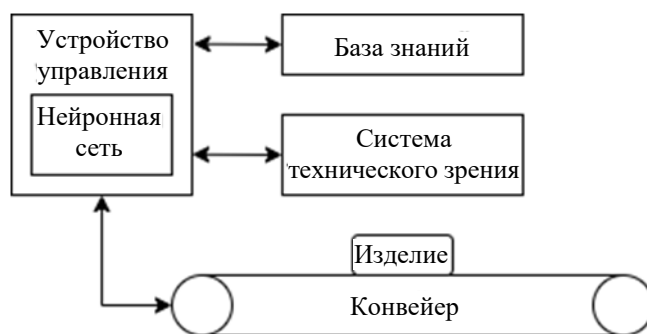


Рис. 1. Схема технической системы выходного контроля качества

Четкость зависит не только от параметров камеры, но и от внешних параметров окружающей среды: освещенности, расстояния от камеры до изделия, движения конвейерной ленты, расположения элемента на ленте, степени отражаемости поверхности исследуемого изделия. Следовательно, задача получения изображения высокого качества для его последующей обработки методами компьютерного зрения является своевременной и актуальной.

Особенности технической системы выходного контроля поверхностных дефектов

Для решения данной задачи предлагается управлять положением камеры, состоянием окружающей среды с использованием методов искусственного интеллекта [4]. В контуре управления системой выходного контроля качества расположена нейронная сеть, которая на основе входных параметров (скорости движения ленты, уровня освещенности и расстояния от камеры до изделия) позволяет подбирать управляющее воздействие, изменяющее положение камеры быстро и с высокой точностью. Для согласованности действий всех компонентов рассмотренной системы необходимо учитывать параметры движения конвейерной линии с расположенными на ней изделиями.

Пусть камера, сканирующая расположенные под ней проверяемые изделия, расположена в точке над конвейерной лентой, движущейся с постоянной скоростью v (рис. 2). Для удобства расчетов определим проекцию точки расположения камеры на ось x в точку A с координатой $x = 0$.

Сканирование изделия возможно после его полного попадания в поле захвата камеры, длина которого равна l , через время $\tau = l/v$. При этом учитываем, что захват изделия осуществляется камерой сразу с приемлемой для распознавания четкостью изображения. Четкость получаемого изображения кроме характеристик самой камеры зависит от уровня освещенности сканируемого участка и скорости его движения.

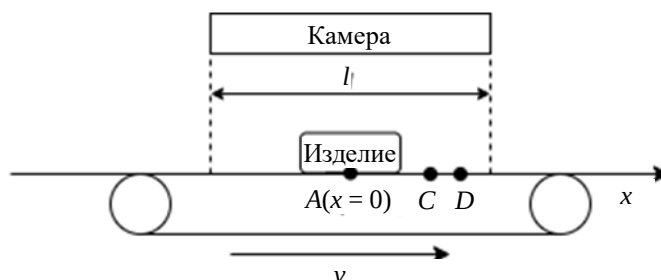


Рис. 2. Схема работы системы контроля поверхностных дефектов

Известно, что четкость изображения оценивается количеством различных линий тестового изображения. При этом использование форматов высокой четкости, например, HD, 4K, приводит к повышению разрешения изображения и применению эффективных методов сжатия для обеспечения высокой скорости передачи данных. Для оценки четкости изображения на основе стандарта ISO 12233:2017 применяется пространственная частотная характеристика, определяемая как функция спада контраста мелких деталей от пространственной частоты. Как правило, для цифровых камер значение пространственной частоты соответствует потенциальному разрешению в пикселях. Однако на практике, по рекомендации того же стандарта, используется реальное разрешение цифровой камеры, определяемое как отношение измеренной частоты к значению 0,5. Например, если пространственная частота равна 0,4, то четкость изображения равна $0,4/0,5 = 0,8$. Очевидно, что чем ближе значение четкости к 1, тем выше качество изображения. Кроме того, разрешение камеры и спад пространственной частотной характеристики определяется параметрами самой камеры и состоянием окружающей среды [5].

Учитывая вышеизложенное, четкость изображения проверяемого изделия на расстоянии x от точки A в точке C в момент времени t равна $q(x, t)$. По истечении малого промежутка времени Δt точка изображения с данной четкостью сместится на расстояние $x + \Delta x$ в точку D , но при этом четкость изображения в ней сохранится. Следовательно,

$$q_C(x, t) = q(x, t) = q_D(x + \Delta x, t + \Delta t). \quad (1)$$

В тот же момент времени четкость изображения в новой точке изделия, пришедшей в точку C , равна $q_C(x, t + \Delta t)$. При этом

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow \infty} \frac{q_D(x + \Delta x, t + \Delta t) - q_C(x, t + \Delta t)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow \infty} \frac{q_C(x, t) - q_C(x, t + \Delta t)}{\Delta x}. \quad (2)$$

Известно, что при постоянной скорости конвейерной ленты $\Delta x = v\Delta t$, тогда

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{1}{v} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q(x, t) - q(x, t + \Delta t)}{\Delta t} = -\frac{1}{v} \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (3)$$

Изображение Лапласа при $x(0) = 0$ для уравнения (3) имеет вид

$$\frac{\partial Q(x, s)}{\partial x} + \frac{s}{v} Q(x, s) = 0. \quad (4)$$

Решая данное уравнение, в котором x – независимая переменная, получим

$$Q(x, s) = C(t) e^{-\frac{sx}{v}}, \quad (5)$$

где не зависящая от x величина $C(t)$ определяется краевыми условиями. Если входной величиной является сама функция $q(0, t)$, а выходной – $q(l, t)$, то получаем краевые условия первого рода, при которых

$$Q_{\text{вх}} = Q(0, s) - C(t); \quad Q_{\text{вых}} = Q(l, s) = C(t) e^{-\frac{sl}{v}} = Q(0, s) e^{-s\tau}, \quad (6)$$

где $\tau = l/v$.

Передаточная функция имеет вид

$$W(l, s) = \frac{Q_{\text{ВЫХ}}}{Q_{\text{ВХ}}} = e^{-s\tau}. \quad (7)$$

Переходная функция $h(t) = 1(1 - \tau)$. Характеристическое уравнение $D(s) = e^{s\tau} = e^{\alpha\tau} e^{j\omega\tau} = 0$ имеет бесконечное множество корней с бесконечно большой отрицательной вещественной частью. Частотная характеристика $W(t, j\omega) = e^{-j\omega\tau} = \cos\omega\tau - j\sin\omega\tau$ имеет равный единице модуль и изображается кругом единичного радиуса с центром в начале координат. При бесконечном возрастании ω этот круг бесчисленное количество раз отображается по часовой стрелке. Относительные амплитуды выходной величины при всех частотах равны единице.

Уточним математическую модель рассматриваемой системы выходного контроля качества выпускаемой продукции, приближенно учитывая инерционность перемещения изделия на конвейерной ленте. Пусть входной $u_{\text{ВХ}}$ и выходной $u_{\text{ВЫХ}}$ сигналы связаны с четкостью получаемого изображения q и $q(l, t)$ уравнениями:

$$(T_1 p + 1)q = k_1 u_{\text{ВХ}}; \quad (T_2 p + 1)u_{\text{ВЫХ}} = k_2 q(l, t), \quad (7)$$

тогда

$$Q(0, s) = \frac{k_1 U_{\text{ВХ}}(s)}{T_1 s + 1}; \quad Q(l, s) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(s)(T_2 s + 1)}{k_2}; \quad (8)$$

$$W = \frac{U_{\text{ВХ}}(s)}{U_{\text{ВЫХ}}(s)} = \frac{k_1 k_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \frac{Q(l, s)}{Q(0, s)} = W_0 W_\tau, \quad (9)$$

где $W_0 = \frac{k_1 k_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ – передаточная функция линейной части рассматриваемой системы;

$W_\tau = e^{-s\tau}$ – передаточная функция конвейерной составляющей рассматриваемой системы контроля качества выпускаемой продукции.

Таким образом, основной целью управления технической системой выходного контроля качества выпускаемой продукции является выполнение неравенства

$$|q - q(l, \tau)| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

где q – требуемая четкость изображения, получаемого камерой; $q(l, \tau)$ – четкость изображения, полученного камерой; ε – допустимая погрешность.

Разработка модели нейронной сети для управления технической системой выходного контроля качества

Как уже отмечалось выше, итоговая четкость изображения зависит от нескольких параметров, в том числе связей между ними. Учитывать совокупность нескольких связанных параметров эффективнее с использованием нейронной сети. Существующие модели нейронных сетей, основанные на анализе больших данных, позволяют с высокой точностью прогнозировать изменение состояния технической системы и подбирать требуемые параметры для его изменения [5, 6].

Известно, что данные, используемые для разработки модели нейронной сети, делятся на две части: для обучения модели и тестовые – для проверки работоспособности обученной модели. Обучающие данные должны иметь выборку, отражающую их характеристику. В противном случае модель будет плохо работать для тех случаев, которые не встречались в процессе обучения. Для решения данной проблемы предлагается использовать метод типологической выборки, при котором для обучения отбирается 100 комплектов данных, а для тестирования – все остальные, в данном случае - 500. Основная идея типологической выборки заключается в том, чтобы разделить весь диапазон переменных на множество поддиапазонов и отобрать данные таким образом, чтобы масса вероятности в каждом поддиапазоне стала одинаковой между выборкой и совокупностью. Поскольку в данном исследовании задействовано небольшое количество переменных, выборка осуществлялась вручную.

Для оценки эффективности типологической выборки существуют два вида статистических критериев: параметрические и непараметрические [7, 8]. Исходя из того, что функция массы вероятности каждой переменной в данном исследовании не соответствует обычному распределению, использовался непараметрический критерий хи-квадрат. В основе критерия хи-квадрат лежит ошибка между предполагаемой и наблюдаемой плотностями вероятностей. В тесте каждый из диапазонов n наблюдаемых данных разбивается на m поддиапазонов. При этом подсчитывается количество частот n_i переменной в i -м поддиапазоне. Далее сравниваются наблюдаемые частоты n_i , $i = 1, \dots, m$ и соответствующие им теоретические частоты e_i , $i = 1, \dots, m$ предполагаемого распределения. При стремле-

нии общего числа точек выборки n к ∞ величина $\sum_{i=1}^m \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$ приближается к распределению хи-квадрат с $f = m - 1 - k$, где k – число параметров в предполагаемом распределении. Для нетипичного распределения k равно нулю. Считается, что наблюдаемое распределение соответствует предполагаемому распределению с уровнем значимости σ , если

$$\sum_{i=1}^m \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} < c_{1-\sigma, f}, \quad (11)$$

где $c_{1-\sigma, f}$ обозначает значение распределения хи-квадрат со степенью свободы f при кумулятивной массе $1 - \sigma$.

Для оценки эффективности с использованием критерия хи-квадрат диапазон каждой переменной (освещенность, расстояние до сканируемого изделия, степень отражения поверхности изделия, скорость движения конвейерной ленты) разбивался на 8 поддиапазонов. В качестве примера приведено сравнение массовых функций вероятности обучающих данных и экспериментальных значений четкости полученного изображения, которое показывает, что они хорошо согласуются (рис. 3).

Для реализации модели нейронной сети использован многослойный перцептрон, поскольку в модели имеется небольшое число параметров с нелинейной зависимостью. Модель направлена на получение оптимизированных весов сети с помощью алгоритма обучения, который призван минимизировать ошибки между выходной и целевой переменными благодаря изменению взаимосвязанных весов [9, 10]. В данном исследовании используется перцептрон с одним скрытым слоем (рис. 4), где i – число входных переменных.

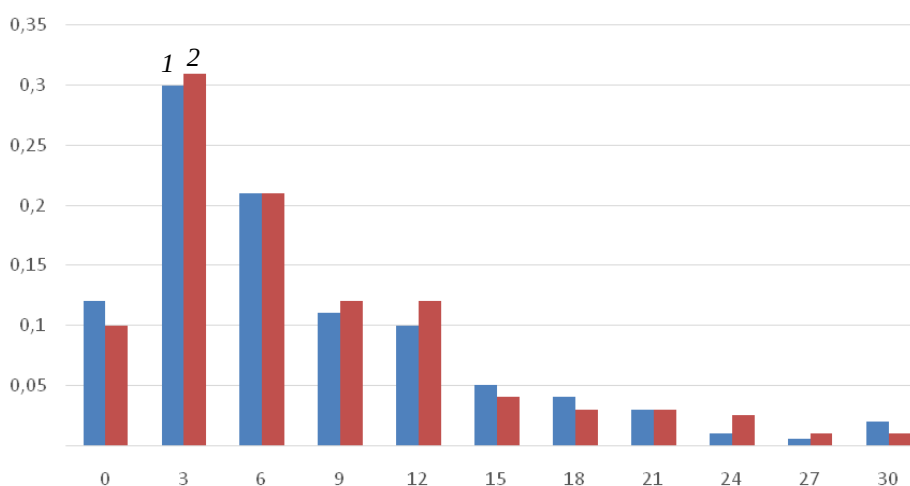
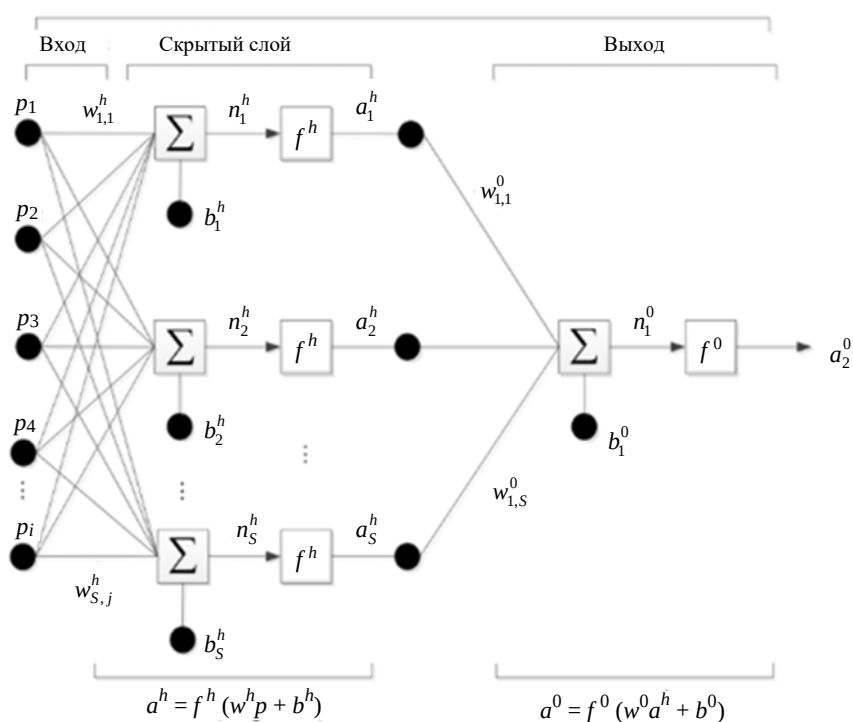


Рис. 3. Массовые функции вероятности четкости полученного изображения:
1 – обучающие данные; 2 – экспериментальные



**Рис. 4. Топология нейронной сети для управления технической системой
выходного контроля качества изделий**

Методика обучения и применения разработанной нейронной сети заключается в следующем:

- 1) для каждой входной и выходной переменных данные нормализуются в рамках диапазона $[-1; 1]$;
- 2) начальные веса в скрытом слое задаются в виде случайных значений, принадлежащих интервалу $[-1; 1]$; начальные смещения устанавливаются равными нулю;

3) матрица весов умножается на входные данные p , и добавляется смещение так, чтобы $n_k^h = \sum_{j=1}^J \omega_{kj}^h p_j + b_k^h$, $k = 1, \dots, K$, где J, K – число входных переменных и скрытых нейронов соответственно; p, b^h, ω^h – входная переменная, смещение и вес в скрытом слое соответственно. Подстрочные индексы веса ω^h записываются следующим образом: первый подстрочный индекс обозначает нейрон, о котором идет речь, второй – входную переменную, к которой относится вес. Рассчитанное значение n_k^h используется в функции активации f^h для вычисления a_k^h . В качестве функции активации используется сигмоидная функция с гиперболическим тангенсом

$$a_k^h = \frac{e^{n_k^h} - e^{-n_k^h}}{e^{n_k^h} + e^{-n_k^h}}; \quad (12)$$

4) в выходном слое используется та же процедура, что и в скрытом слое, за исключением того, что задействован только один нейрон $n_1^0 = \sum_{j=1}^K \omega_{1j}^0 a_j^h + b_1^0$ и линейная функция для вычисления $a_1^0 = n_1^0$.

Нейронная сеть со случайно заданными начальными весами и смещениями не позволяет получить результат с требуемой точностью. Для этого в процессе обучения веса и смещения изменяются таким образом, чтобы минимизировать разницу между выходным и целевым значениями модели. Для обучения сети функция ошибки определяется как $\varepsilon = \left\| \tau - a_1^0 \right\|^2$, где τ – искомый вектор целевых значений.

Для минимизации функции ошибки используется алгоритм Левенберга–Марквардта, применяемый для решения нелинейных задач наименьших квадратов [11]. Как и другие численные алгоритмы минимизации, алгоритм Левенберга–Марквардта – итерационная процедура. Он предполагает наличие параметра затухания μ и коэффициента θ больше единицы. В данном исследовании использовались $\mu = 0,001$ и $\theta = 10$. Если квадратичная ошибка возрастает, то демпфирование увеличивается путем последовательного умножения на θ до тех пор, пока ошибка не уменьшится с новым параметром демпфирования $\mu\theta^k$ для некоторого k .



Рис. 5. Фрагмент изображения с дефектом типа «нависание» до (а) и после (б) управления положением камеры

Если ошибка уменьшается, то на следующем шаге параметр демпфирования делится на θ . Обучение прекращалось, когда цикл достигал 5000 итераций или параметр демпфирования становился слишком большим для дальнейшего обучения.

На рисунке 5 представлены фрагменты изображений поверхностного дефекта типа «нависание» до и после использования предлагаемого в статье способа управления технической системой контроля дефектов. Следовательно, разработанная и включенная в контур управления нейронная сеть позволяет формировать управляющее воздействие для изменения параметров окружающей среды и положения камеры в целях получения изображения высокой четкости, и, как следствие, повышения эффективности распознавания дефектов.

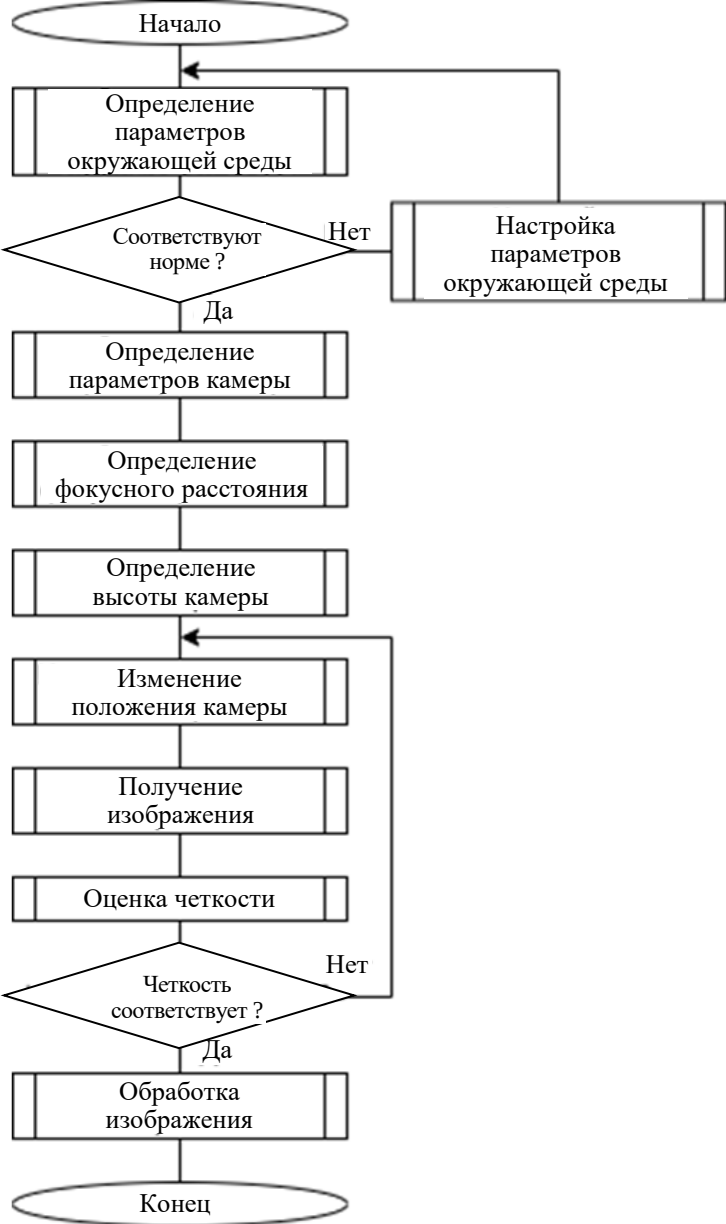


Рис. 6. Блок-схема алгоритма управления технической системой контроля поверхностных дефектов

Алгоритм управления технической системой контроля поверхностных дефектов

Алгоритм управления технической системой контроля поверхностных дефектов условно делится на две части: управление состоянием окружающей среды (освещенностью, скоростью движения ленты); управление положением камеры (рис. 6).

На начальном этапе происходит определение параметров окружающей среды и сравнение их с требуемыми значениями с учетом погрешности. В случае существенного отклонения параметров окружающей среды происходит их корректировка. На следующем этапе определяются технические параметры камеры, рассчитывается фокусное расстояние и измеряется высота положения камеры от сканируемого изделия. При необходимости проводится корректировка положения камеры для получения изображения высокой четкости. Далее дается оценка четкости полученного изображения. При недостаточном значении четкости осуществляется корректировка положения камеры с повторным сканированием изделия. Кроме того, важное значение в работе технической системы контроля поверхностных дефектов имеет калибровка. Периодическая калибровка системы необходима для поддержания высокого качества изображения и включает в себя проверку параметров камеры, освещения и других переменных. Приведенный алгоритм позволяет эффективно управлять технической системой контроля поверхностных дефектов и обеспечивает получение изображений высокой четкости для дальнейшего анализа и принятия решений.

Заключение

Рассмотрены подходы к управлению технической системой выходного контроля качества выпускаемой продукции с использованием методов искусственного интеллекта. Основной частью рассматриваемой системы является система технического зрения, позволяющая визуально определять дефекты на проверяемых изделиях. Качество проверки в значительной степени зависит от качества получаемого изображения, которое, в свою очередь зависит от ряда параметров. Предложенный способ управления технической системой может корректировать параметры, влияющие на качество изображения, путем включения в контур управления нейронной сети на основе перцептрона. Нейронная сеть с высокой точностью позволяет прогнозировать изменение значимых параметров и формировать управляющее значение для их корректировки, что, в свою очередь, дает возможность получить высокое качество изображения проверяемой продукции в режиме реального времени без ручной настройки исполнительного оборудования.

Список литературы

1. Круглов, М. Г. Контроль качества в современных условиях / М. Г. Круглов, Д. С. Юрин // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 193 – 199. doi: 10.24412/2071-6168-2023-7-193-194
2. Скрипко, Л. Е. Становление взглядов на менеджмент качества / Л. Е. Скрипко // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 395 – 421. doi: 10.21638/11701/spbu08.2022.304
3. Данилевич, С. Б. Выходной контроль: влияние индекса качества продукции на риски принятия ошибочных решений / С. Б. Данилевич, В. В. Третьяк // Компетентность. – 2022. – № 4. – С. 32 – 35. doi: 10.24412/1993-8780-2022-4-32-35
4. Смирнов, К. К. Автоматизация операций прослеживаемости качества интегральных структур при производстве сверхбольших интегральных схем / К. К. Смирнов // Труды МАИ. – 2017. – № 95. – 26 с. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30047804_38807198.pdf (дата обращения: 01.03.2024).

5. Сай, С. В. Способ оценки четкости фотореалистичных изображений с высоким разрешением / С. В. Сай // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 121 – 129. doi: 10.18287/2412-6179-CO-899
6. Емельянова, М. Г. Обнаружение поверхностных дефектов сварных соединений при визуальном контроле методами машинного зрения / М. Г. Емельянова, С. С. Смаилова, О. Е. Бакланова // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 112 – 118. doi: 10.18287/2412-6179-CO-1137
7. Баранов, В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой / В. А. Баранов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 3(37). – С. 20 – 29. doi: 10.21685/2307-5538-2021-3-3
8. Войтюк, И. Н. Программно-аппаратный комплекс контроля качества медно-никелевой руды на ленточном конвейере / И. Н. Войтюк, И. В. Пантюшин // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 56 – 62.
9. Прыткова, Е. А. Анализ применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества / Е. А. Прыткова, В. М. Давыдов // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 74 – 81. doi: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81
10. Шевнина, Ю. С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных / Ю. С. Шевнина // Известия вузов. Электроника. – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 407 – 415. doi: 10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415
11. Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики / Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, Е. В. Конюхов, А. Д. Харитонов // Известия вузов. Электроника. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 537 – 546. doi: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-537-546
12. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с пол. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия–Телеком, 2006. – 383 с.
13. Interactive Multidimensional Modeling of Linked Data for Exploratory OLAP / E. Gallinucci, M. Golfarelli, S. Rizzi, A. Abelló, O. Romero // Information Systems. – 2018. – Vol. 77. – P. 86 – 104. doi: 10.1016/j.is.2018.06.004
14. Cheraghalipour, A. Tree Growth Algorithm (TGA): A Novel Approach for Solving Optimization Problems / A. Cheraghalipour, M. Hajiaghahi-Keshteli, M. M. Paydar // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 72. – P. 393 – 414. doi: 10.1016/j.engappai.2018.04.021

Managing the Control System for Surface Defects of Microelectronics Products

Yu. S. Shevnina✉

*Department of Corporate Information Technologies and Systems,
yusm@rambler.ru; National Research University "MIET", Moscow, Russia*

Keywords: technical system control; output quality control; control loop; technical vision system; automation of output quality control.

Abstract: The article discusses approaches to managing a technical system for output quality control of manufactured products using artificial intelligence methods. One of the components of the final quality control system is a technical vision system, which allows for visual inspection of manufactured products. The accuracy of such a system depends on the quality of the resulting images, the main indicator of which is clarity. The authors examined the management features of the technical system for

output quality control, and determined the main goal of the control – obtaining an image of a given clarity. The camera position and external parameters (lighting, conveyor belt speed, etc.) are controlled by a neural network. The article shows the main stages of its training and provides an assessment of the effectiveness of its use. The proposed solution allows for output quality control of manufactured products with high accuracy without the use of manual adjustment or fine-tuning of executive equipment and can be used in various subject areas.

References

1. Kruglov M.G., Yurin D.S. [Quality control in modern conditions], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News of Tula State University. Technical science], 2023, no. 7, pp. 193-199. doi: 10.24412/2071-6168-2023-7-193-194 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Skripko L.E. [Formation of views on quality management], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment* [Bulletin of St. Petersburg University. Management], 2022, vol. 21, no. 3, pp. 395-421. doi: 10.21638/11701/spbu08.2022.304 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Danilevich S.B., Tretyak V.V. [Output control: the influence of the product quality index on the risks of making erroneous decisions], *Kompetentnost'* [Competence], 2022, no. 4, pp. 32-35. doi: 10.24412/1993-8780-2022-4-32-35 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Smirnov K.K. [Automation of operations for traceability of the quality of integrated structures in the production of ultra-large-scale integrated circuits], *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2017, no. 95, 26 p. available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_30047804_38807198.pdf (accessed 01 March 2024) (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sai S.V. [A method for assessing the clarity of high-resolution photorealistic images], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2022, vol. 46, no. 1, pp. 121-129. doi: 10.18287/2412-6179-CO-899 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Emelyanova M.G., Smailova S.S., Baklanova O.E. [Detection of surface defects in welded joints during visual inspection using machine vision methods], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2023, vol. 47, no. 1, pp. 112-118. doi: 10.18287/2412-6179-CO-1137 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Baranov V.A. [Information and control system for active control of technological processes in the production of products with a heterogeneous structure], *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Control. Control], 2021, no. 3(37), pp. 20-29. doi: 10.21685/2307-5538-2021-3-3 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Voytyuk I.N., Pantyushin I.V. [Hardware and software complex for quality control of copper-nickel ore on a conveyor belt], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestia of Tula State University. Technical science], 2020, no. 12, pp. 56-61. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Prytkova E.A., Davydov V.M. [Analysis of the use of hierarchical neural network methods in quality control], *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after. G.I. Nosova], 2023, vol. 21, no. 1, pp. 74-81. doi: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Shevnina Yu.S. [Method for assessing the state of a nonlinear system based on logical data analysis], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [News of universities. Electronics], 2022, vol. 27, no. 3, pp. 407-415. doi: 10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Shevnina Yu.S., Gagarina L.G., Konyukhov E.V., Kharitonova A.D. [Method of cluster analysis of heterogeneous data using the provisions of fuzzy logic], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [News of universities. Electronics], 2023, no. 4, pp. 445-452. doi: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-537-546 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems], Moscow: Hotline-Telecom, 2006, 383 p. (In Russ.)

13. Gallinucci E., Golfarelli M., Rizzi S., Abelló A., Romero O. Interactive Multidimensional Modeling of Linked Data for Exploratory OLAP, *Information Systems*, 2018, vol. 77, pp. 86-104. doi: 10.1016/j.is.2018.06.004

14. Cheraghalipour A., Hajiaghaei-Keshteli M., Paydar M.M. Tree Growth Algorithm (TGA): A Novel Approach for Solving Optimization Problems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, vol. 72, pp. 393-414. doi: 10.1016/j.engappai.2018.04.021

Steuerung des Systems der Überwachung von Oberflächenfehlern der Mikroelektronikprodukte

Zusammenfassung: Es sind Ansätze zur Steuerung des technischen Systems zur Output-Qualitätskontrolle hergestellter Produkte unter Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz betrachtet. Eine der Komponenten des Ausgabequalitätskontrollsystems ist das technische Bildverarbeitungssystem, das eine visuelle Inspektion der hergestellten Produkte ermöglicht. Die Genauigkeit eines solchen Systems hängt von der Qualität der resultierenden Bilder ab, deren Hauptindikator die Klarheit ist. Es sind die Kontrollmerkmale des technischen Systems der Ausgabequalitätskontrolle betrachtet und das Hauptziel der Kontrolle bestimmt – die Erlangung eines Bildes mit einer bestimmten Klarheit. Die Kameraposition und externe Parameter (Beleuchtung, Förderbandgeschwindigkeit etc.) werden durch ein neuronales Netzwerk gesteuert. Es sind die wichtigsten Phasen seiner Ausbildung aufgezeigt und die Wirksamkeit seines Einsatzes beurteilt. Die vorgeschlagene Lösung ermöglicht es, die Qualitätskontrolle der Ausgangsprodukte mit hoher Genauigkeit durchzuführen, ohne dass manuelle Einstellungen oder Feinabstimmungen an den Ausführungsgeräten erforderlich sind. Sie kann in verschiedenen Fachbereichen eingesetzt werden.

Commande du système de contrôle des défauts de surface des produits microélectroniques

Résumé: Sont examinés les approches envers la commande du système technique de contrôle de la qualité des produits à l'aide de techniques d'intelligence artificielle. L'un des composants du système de contrôle de la qualité de sortie est un système de vision technique permettant une inspection visuelle des produits fabriqués. La précision d'un tel système dépend de la qualité des images obtenues, dont l'indicateur principal est la clarté. Sont examinées les caractéristiques de la commande du système technique de contrôle de la qualité de sortie; est défini l'objectif principal de la gestion, celui d'obtenir une image d'une clarté donnée. Le contrôle de la position de la caméra et des paramètres externes (éclairage, vitesse de la bande transporteuse, etc.) est effectué par un réseau de neurones. Sont indiquées les principales étapes de sa formation; est évaluée l'efficacité de son utilisation. La solution proposée permet de contrôler la qualité de sortie de la production avec une grande précision sans utiliser de réglage manuel ou d'affinage de l'équipement d'exécution et peut être utilisée dans divers domaines.

Автор: Шевнина Юлия Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры корпоративных информационных технологий и систем, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Россия.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

С. В. Пономарев✉, С. С. Баранов

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения»,
svponom@yahoo.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: измерение; коэффициент температуропроводности; минимизация; обработка данных; оптимизация; относительные погрешности; теплопроводность.

Аннотация: Выполнено математическое моделирование процесса теплопереноса в образце материала методом плоского импульсного источника теплоты. Предложена методика обработки информации об изменении во времени разностей температур, зарегистрированных в процессе эксперимента. Разности температур имеют вид элементов массива и соответствуют определенным значениям моментов времени. Применение методики позволяет уменьшить погрешности измерений теплофизических характеристик материала.

Введение

В условиях динамично развивающихся технологий и создания новых материалов актуально изучение их теплофизических свойств (ТФС). В последнее десятилетие достаточно активно проводятся исследования, посвященные разработке и модернизации новых методик применения методов «мгновенных» и(или) импульсных источников теплоты или влаги [1 – 9]. Решения, приведенные в работе [10], а также обзор [11] численно-аналитических и экспериментальных методов определения ТФС материалов свидетельствуют о том, что основным подходом к получению знаний о ТФС новых веществ и материалов по-прежнему остается экспериментальное измерение этих свойств с последующей обработкой полученных данных по соответствующим алгоритмам в составе измерительных систем [12, 13].

При использовании многих известных методов (в том числе и методов линейного или плоского импульсных источников теплоты) экспериментального определения ТФС веществ и материалов в процессе обработки измерительной информации обычно используют ограниченный объем экспериментальных данных. Довольно часто на практике при вычислении искомых значений ТФС из большого по объему массива полученных экспериментальных исходных данных выделяется и используется единственный элемент массива [1 – 3, 5, 8, 9], соответствующий так называемым «оптимальным условиям» измерения и обработки информации.

Цель статьи – выработка рекомендаций по использованию большего объема первичной информации, полученной в процессе проведения эксперимента при измерении ТФС теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного

источника теплоты. Предлагаемый в статье подход позволяет повысить точность определения искомых ТФС за счет снижения влияния случайных погрешностей, возникающих при измерении непосредственно определяемых в ходе эксперимента значений физических величин (разностей температур, электрической мощности, геометрических размеров и т.п.).

Физическая модель измерительного устройства

Физическая модель измерительного устройства представляет собой ячейку [1 – 3, 5, 8, 9], в которую помещают образец, состоящий из трех пластин: нижней, средней и верхней. Наиболее высокие требования предъявляются к точности изготовления [1, 8, 9]:

- средней пластины заданной толщины x , верхняя и нижняя грани которой должны быть выполнены строго параллельно друг другу и тщательно отшлифованы;

- верхняя грань нижней пластины и нижняя грань верхней пластины также должны быть тщательно отшлифованы в целях снижения теплового сопротивления в местах их контакта с нижней и верхней гранями средней пластины.

Между нижней и средней пластинами обычно размещают малоинерционный плоский нагреватель, а между средней и верхней пластинами устанавливают первичный измерительный преобразователь температуры, например, термопару. Конструкции аналогичных измерительных устройств подробнее рассмотрены в [1 – 5, 8, 9].

Математическая модель температурного поля

Математическая модель температурного поля $T(x, \tau)$ в плоском образце (в случае использования импульсного плоского источника теплоты) может быть записана в виде [5, 7 – 9]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \infty; \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0 = 0; \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q(\tau, \tau_{\text{и}}) = q_c [h(\tau) - h(\tau - \tau_{\text{и}})]; \quad (3)$$

$$T(\infty, \tau) = T_0 = 0, \quad (4)$$

где $T(x, \tau)$ – температура исследуемого образца в плоскости с координатой x в момент времени τ , отсчитываемый с момента начала активной стадии эксперимента, °С; $a = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность исследуемого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); $q(\tau, \tau_{\text{и}})$ – импульсный плоский источник теплоты, Вт/м²; q_c – тепловой поток, подводимый к образцу через поверхность $x = 0$ в течение промежутка времени $0 < \tau \leq \tau_{\text{и}}$, Вт/м²; $h(\tau)$, $h(\tau - \tau_{\text{и}})$ – единичные асимметричные ступенчатые функции, задаваемые соотношениями [14]:

$$h(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau < 0; \\ 1 & \text{при } \tau \geq 0; \end{cases} \quad h(\tau - \tau_{\text{и}}) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau < \tau_{\text{и}}; \\ 1 & \text{при } \tau \geq \tau_{\text{и}}; \end{cases} \quad (5)$$

$\tau_{\text{и}}$ – длительность теплового импульса $q(\tau, \tau_{\text{и}})$, с.

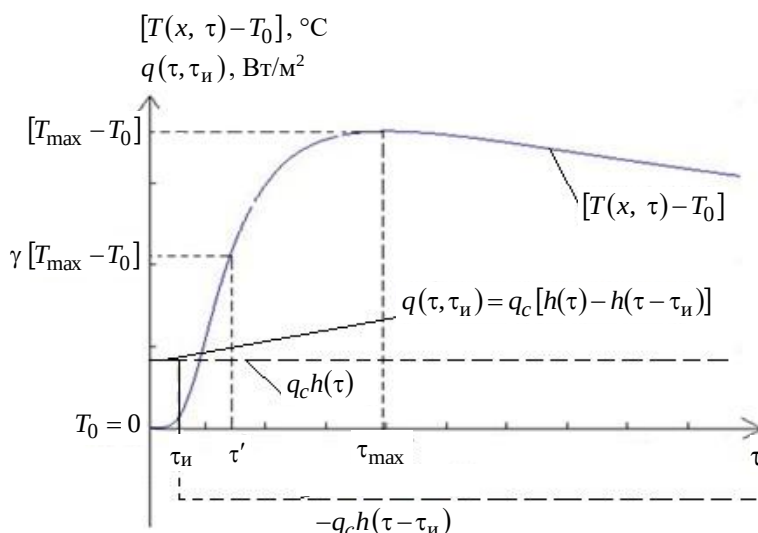


Рис. 1. Изменение во времени τ физических величин: теплового импульса $q(\tau, \tau_n) = q_c [h(\tau) - h(\tau - \tau_n)]$, представляющего собой алгебраическую сумму ступенчатых функций $q_c h(\tau)$ и $-q_c h(\tau - \tau_n)$; разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$ на расстоянии x от плоского импульсного источника теплоты

Используемое в математической модели (1) – (4) граничное условия 2-го рода в виде соотношения (3) графически проиллюстрировано на рис. 1.

На основе использования принципа суперпозиции и приведенных в [5] результатов, решение краевой задачи (1) – (4) с учетом граничного условия (3) принимает вид

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{2q_c}{\lambda} f(x, \tau, \tau_n, a), \quad (6)$$

где

$$f(x, \tau, \tau_n, a) = \begin{cases} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) & \text{при } 0 < \tau \leq \tau_n; \\ \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \sqrt{a(\tau - \tau_n)} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_n)}}\right) & \text{при } \tau > \tau_n, \end{cases} \quad (7)$$

$\operatorname{ierfc}(u) = \int_u^\infty \operatorname{erfc}(W) dW = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \operatorname{erfc}(u)$ – специальная функция [5, 7 – 9],

представляющая собой интеграл от функции $\operatorname{erfc}(W) = 1 - \operatorname{erf}(W)$;

$\operatorname{erf}(W) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^W e^{-W^2} dW$ – функция ошибок Гаусса [7, 14].

Для времени $\tau \geq \tau_n$ решение (6) с учетом (7) принимает вид

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c x}{\lambda} \left[\frac{\operatorname{ierfc}[U(\tau)]}{U(\tau)} - \frac{\operatorname{ierfc}[U(\tau - \tau_n)]}{U(\tau - \tau_n)} \right], \quad (8)$$

где $U(\tau) = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$, $U(\tau - \tau_{\text{и}}) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_{\text{и}})}}$ – безразмерные функции, зависящие

от $x, \tau, \tau_{\text{и}}, a$, причем $U(\tau - \tau_{\text{и}}) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_{\text{и}})}} = \frac{x}{2\sqrt{a\tau \left(\frac{\tau - \tau_{\text{и}}}{\tau}\right)}} = U(\tau) \sqrt{\frac{\tau}{\tau - \tau_{\text{и}}}}$.

График зависимости (8) также приведен на рис. 1, откуда видно, что рассчитанное по данной формуле изменение разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$ в момент времени $\tau = \tau_{\text{max}}$ достигает максимального значения $[T_{\text{max}} - T_0] = [T(x, \tau_{\text{max}}) - T_0]$, причем этому моменту времени $\tau = \tau_{\text{max}}$ соответствует определенное значение

безразмерной функции $U^m = U(\tau_{\text{max}}) - \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{max}}}}$.

Подход к проведению эксперимента и последующая обработка полученных данных

Ранее применявшийся подход к проведению эксперимента и последующей обработке полученных данных при измерении ТФС методом плоского импульсного источника теплоты состоит в следующем [8, 9]:

1) изготавливают образец исследуемого материала в виде трех пластин, между которыми размещают плоский нагреватель и термопару, а затем дожидаются достижения равномерного распределения температурного поля $T(x, \tau) = T_0 = \text{const}$ внутри образца исследуемого материала;

2) в течение заданного промежутка времени $0 < \tau \leq \tau_{\text{и}}$ на плоский электронагреватель площадью S подают постоянную мощность P и по сигналу термопары регистрируют изменение во времени разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$;

3) по полученным экспериментальным данным определяют максимальное значение разности температур $[T_{\text{max}} - T_0] = [T(x, \tau_{\text{max}}) - T_0]$ и значение момента времени $\tau = \tau'$, соответствующее заранее заданному оптимальному значению параметра

$$\gamma = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_{\text{max}} - T_0},$$

представляющего собой отношение текущего значения разности температур $[T(x, \tau) - T_0]$, имеющего место в момент времени τ , к максимальному значению $[T_{\text{max}} - T_0] = [T(x, \tau_{\text{max}}) - T_0]$ разности температур в момент времени $\tau = \tau_{\text{max}}$. Ранее в работах [8, 9] определено оптимальное значение $\gamma = 0,465$ данного параметра;

4) по полученным значениям τ' , $[T_{\text{max}} - T_0]$ с учетом известных x , $q_c = P/2S$ вычисляют искомые значения коэффициента температуропроводности a и теплопроводности λ исследуемого материала по формулам, приведенным в [8, 9].

Недостатком ранее применявшегося подхода к обработке экспериментальных данных является то, что из имеющегося достаточно большого массива экспериментальных данных используется фактически только:

- одна точка при вычислении коэффициента температуропроводности;
- вторая точка для вычисления коэффициента теплопроводности.

Предложенный алгоритм обработки экспериментальных данных предусматривает использование практически всего массива экспериментально измеренных значений температур, что обеспечивает снижение величины результирующих погрешностей измерения коэффициента температуропроводности и коэффициента теплопроводности исследуемого материала.

Алгоритм обработки экспериментальной информации

Разработанный алгоритм базируется на использовании большего количества экспериментальных точек (практически всего массива экспериментально измеренных значений разностей температур $[T(x, \tau_i) - T_0]$). Отметим, что впервые аналогичный подход изложен в статье [15]. В процессе эксперимента (при измеренном или известном расстоянии x между линейным нагревателем и термопарой, а также при измеренном или заданном значении теплового потока $q_c = P/2S$) регистрируют элементы массива в виде экспериментально измеренных в моменты времени τ_i значений разностей температур $T_3(\tau_i) = [T(x, \tau_i) - T_0]_p$.

Далее подбирают наилучшие пары искомых значений коэффициентов тепло- и температуропроводности λ_x, a_x , при которых вычисленные по формуле (8) для тех же значений координаты x , теплового потока $q_c = P/2S$ и моментов времени $\tau_i, i = 1, 2, \dots, N$, расчетные значения разностей температур

$$T_p(a_x, \lambda_x, x, \tau_i) = [T(x, \tau_i) - T_0]_p \quad (9)$$

наиболее близки к экспериментально измеренным значениям $T_3(\tau_i)$.

При практическом решении данной задачи в процессе перебора значений λ_x, a_x с небольшим шагом в заранее заданных диапазонах $a_{\min} < a_x < a_{\max}$, $\lambda_{\min} < \lambda_x < \lambda_{\max}$ осуществляют вычисление и минимизацию целевой функции в виде суммы квадратов отклонений

$$F(a_x, \lambda_x) = \sum_{i=1}^N [T_p(a_x, \lambda_x, x, \tau_i) - T_3(\tau_i)]^2 = \min. \quad (10)$$

В качестве искомых значений ТФС принимается та пара значений λ_x, a_x , при которых достигается минимум целевой функции (10).

При указании диапазонов изменения ТФС необходимо учитывать предварительную информацию об ожидаемых значениях λ_x, a_x , полученных, например, численно-аналитическими методами [11] или приблизительно оцененные на менее точном измерительном устройстве.

Подтверждение работоспособности алгоритма обработки экспериментальных данных с применением численного математического моделирования

Процедура численного моделирования процесса обработки экспериментальных данных включает следующие этапы:

- 1) задание пары значений ТФС λ_t, a_t , соответствующих определенному материалу и принимаемых в качестве точных (при расчетах использованы известные значения ТФС полиметилметакрилата);
- 2) при заданных точных значениях ТФС вычисление (с постоянным шагом Δt во времени) значений разностей температур $T_3(x, \tau_i)$ по формуле (8) с после-

дующей регистрацией элементов массива этих значений разностей температур и регистрацией массива $T_3(x, \tau_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, соответствующих моментов времени τ_i ;

3) внесение случайных относительных погрешностей в элементы массива $T(x, \tau_i) - T_0$. Для внесения в зарегистрированные значения элементов массива $T(x, \tau_i) - T_0$ случайных относительных погрешностей порядка $100/A$ процентов, где $A = 50$, то есть в пределах 2 %, каждый элемент массива умножали на число A , затем (с использованием функции округления чисел) отбрасывали дробные части полученных элементов массива и делили результаты округления на число A . В результате получали закругленные (по отношению к первоначально рассчитанным исходным (точным) значениям $T(x, \tau_i) - T_0$) значения $[T(x, \tau_i) - T_0]^{FP}$ элементов массива, в которые внесены случайные относительные погрешности порядка 2 %;

4) полученные закругленные значения элементов массива использовали при численном моделировании в качестве экспериментально измеренных значений, то есть считали, что

$$T_3(\tau_i) = [T(x, \tau_i) - T_0]^{FP}; \quad (11)$$

5) в процессе перебора значений λ_x , a_x с небольшим шагом в заранее заданных диапазонах $a_{\min} < a_x < a_{\max}$, $\lambda_{\min} < \lambda_x < \lambda_{\max}$ вычисляли и минимизировали целевую функцию (10), где $T_p(a_x, \lambda_x, x, \tau_i)$ (см. формулу (9)) – рассчитанные по формуле (8) разности температур, соответствующие моментам времени τ_i , $i = 1, 2, \dots, N$, при заданных (на каждом этапе расчетов) значениях ТФС λ_x , a_x ; $T_3(x, \tau_i)$ определяется формулой (11) и представляет псевдоэкспериментальные значения элементов массива, соответствующие моментам времени τ_i . Затем находили искомую пару значений ТФС, при которых достигается минимум целевой функции (10).

Нахождение числа экспериментальных точек N , обеспечивающего требуемую точность определения искомых ТФС в процессе обработки данных

Вначале вычисляли относительные погрешности (неопределенности расчета искомых величин) $\delta\lambda_p$, δa_p полученных значений коэффициентов λ_x , a_x :

$$\delta\lambda_p = (\lambda_x - \lambda_T) / \lambda_T;$$

$$\delta a_p = (a_x - a_T) / a_T,$$

а затем находили сумму данных погрешностей $\delta\lambda_p + \delta a_p$.

При этом значения искомых величин рассчитывали при числе экспериментальных точек $N = 20, 40, 60, 80, 100, 120$.

На рисунке 2 приведена зависимость суммарной погрешности $\delta\lambda_p + \delta a_p$ от числа N экспериментальных точек. Очевидно, что при увеличении числа используемых экспериментальных точек сумма двух погрешностей $\delta\lambda_p + \delta a_p$ уменьшается, причем, если при $N = 20$ суммарная относительная погрешность алгоритма обработки данных $\delta\lambda_p + \delta a_p \approx 0,8$ %, то при $N = 50$ и более погрешность алгоритма обработки не превышает величины 0,25 %.

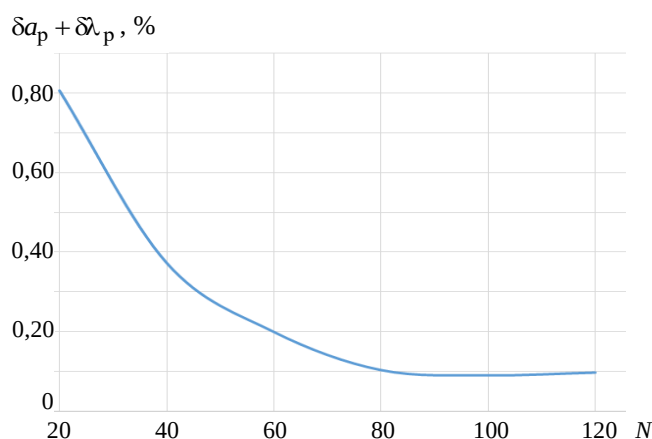


Рис. 2. Зависимость суммарной погрешности $\delta a_p + \delta \lambda_p$ от числа экспериментальных точек N

Заключение

Рассмотренный алгоритм обработки экспериментальной информации обеспечивает повышение точности определения искомых ТФС за счет уменьшения влияния случайных погрешностей измерения непосредственно определяемых в ходе эксперимента физических величин (разностей температур).

Разработанный подход, основанный на использовании компьютерного численного математического моделирования процесса измерения теплофизических свойств методом плоского импульсного источника теплоты, позволяет еще на этапе проектирования (то есть до начала изготовления экспериментальной установки) существенно снизить затраты времени, материальных и финансовых ресурсов на выполнение научно-исследовательских работ по оценке погрешностей измерения ТФС материалов по сравнению со случаем экспериментального проведения работ после изготовления опытного образца (макета) измерительного устройства.

Список литературы

1. Теоретические и практические основы теплофизических измерений : монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин, В. А. Вертоградский ; под редакцией С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
2. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.
3. Теплофизические измерения и приборы : учеб. пособие / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г.С. Петров ; под ред. Е. С. Платунова. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.
4. Годовский, Ю. К. Теплофизические методы исследования полимеров / Ю. К. Годовский. – М. : Химия, 1976. – 216 с.
5. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
6. Харламов, А. Г. Измерение теплопроводности твердых тел / А. Г. Харламов. – М. : Атомиздат, 1973. – 152 с.
7. Лыков, А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

8. Пономарев, С. В. Минимизация погрешностей измерений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, Е. В. Буланов, В. О. Буланова, А. Г. Дивин // Измерительная техника. – 2018. – № 12. – С. 43 – 46. doi: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46
9. Буланов, Е. В. Повышение точности измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с применением метода плоского импульсного источника теплоты : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Буланов Евгений Владимирович. – Тамбов, 2019. – 122 с.
10. Дмитриев, О. С. Численно-аналитическое решение нелинейной коэффициентной обратной задачи теплопроводности / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 6. – С. 1426 – 1437. doi: 10.1007/s10891-018-1869-x
11. Пономарев, С. Обзор экспериментальных и численно-аналитических методов определения теплофизических характеристик гетерогенных материалов растительного происхождения / С. Пономарев, А. Дивин, В. Сычев ; под ред. С. Пономарева. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2017. – 80 с.
12. Живенкова, А. А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 4(54). – С. 212 – 217.
13. Дмитриев, О. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 73 – 83.
14. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.
15. Определение теплофизических свойств материалов методом линейного импульсного источника теплоты с обработкой большого числа экспериментальных данных / С. В. Пономарев, Е. В. Буланов, В. О. Буланова, А. Г. Дивин, С. С. С. Аль-Бусаиди // Метрология. – 2019. – № 3. – С. 56 – 66.

An Algorithm for Processing a Large Number of Experimental Data while Measuring Thermal Physical Properties of Materials by the Flat Pulse Heat Source Method

S. V. Ponomarev✉, S. S. Baranov

*Department of Mechatronics and Technological Measurements,
svponom@yahoo.com; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: measurement; thermal diffusivity coefficient; minimization; data processing; optimization; relative errors; thermal conductivity.

Abstract: Mathematical modeling of the heat transfer process in a material sample using the method of a flat pulsed heat source was performed. A technique is proposed for processing information about changes in temperature differences over time recorded during the experiment. Temperature differences have the form of array elements and correspond to certain values of moments in time. The use of the technique makes it possible to reduce the measurement errors of the thermophysical characteristics of the material.

References

1. Ponomarev S.V. (Ed.), Mishchenko S.V., Divin A.G., Vertogradskiy V.A. *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy: monografiya* [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements: monograph], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)
2. Platunov Ye.S. (Ed.), Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: ucheb. posobiye* [Thermophysical measurements: textbook], St. Petersburg: SPbGUNIPT, 2010, 738 p. (In Russ.)
3. Platunov Ye.S. (Ed.), Buravoy S.Ye., Kurepin V.V., Petrov G.S. *Teplofizicheskiye izmereniya i pribory: ucheb. posobiye* [Thermophysical measurements and instruments: textbook], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986, 256 p. (In Russ.)
4. Godovskiy Yu.K. *Teplofizicheskiye metody issledovaniya polimerov* [Thermophysical methods for studying polymers], Moscow: Khimiya, 1976, 216 p. (In Russ.)
5. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.N., Kozlov V.P.; Lykov A.V. (Ed.). *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and temperature diffusivity], Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.)
6. Kharlamov A.G. *Izmereniye teploprovodnosti tverdykh tel* [Measuring the thermal conductivity of solids], Moscow: Atomizdat, 1973, 152 p. (In Russ.)
7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti: ucheb. posobiye* [Theory of thermal conductivity: textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)
8. Ponomarev S.V., Bulanov Ye.V., Bulanova V.O., Divin A.G. [Minimization of errors in measuring the coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity of thermal insulation materials using the method of a flat pulsed heat source], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology], 2018, no. 12, pp. 43-46. doi: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Bulanov Ye.V. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2019, 122 p. (In Russ.)
10. Dmitriyev O.S., Zhivenkova A.A. [Numerical and analytical solution of the nonlinear coefficient inverse problem of heat conduction], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering and Physical Journal], 2018, vol. 91, no. 6, pp. 1426-1437. doi: 10.1007/s10891-018-1869-x (In Russ., abstract in Eng.)
11. Ponomarev S. (Ed.), Divin A., Sychev V. *Obzor eksperimental'nykh i chislenno-analiticheskikh metodov opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik geterogennykh materialov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Review of experimental and numerical-analytical methods for determining the thermophysical characteristics of heterogeneous materials of plant origin], Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2017, 80 p. (In Russ.)
12. Zhivenkova A.A., Dmitriyev O.S. [Algorithmic and software support for an information-measuring system for studying the thermophysical characteristics of polymer composites during the curing process], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 4(54), pp. 212-217. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Dmitriyev O.S., Zhivenkova A.A., Dmitriyev A.O. [Intelligent information-measuring system for determining the thermophysical characteristics of polymer composites], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 73-83. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of mathematics for scientists and engineers], Moscow: Nauka, 1973, 832 p. (In Russ.)
15. Ponomarev S.V., Bulanov Ye.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Al'-Busaidi S.S.S. [Determination of thermophysical properties of materials by the method of a linear pulsed heat source with processing of a large number of experimental data], *Metrologiya* [Metrology], 2019, no. 3, pp. 56-66. (In Russ., abstract in Eng.)

Algorithmus zur Verarbeitung einer großen Anzahl experimenteller Daten zur Messung thermophysikalischer Eigenschaften von Materialien mit der Methode der flächenhaften Pulswärmequelle

Zusammenfassung: Es ist eine mathematische Modellierung des Wärmeübertragungsprozesses in einer Materialprobe mit der Methode der flachen gepulsten Wärmequelle durchgeführt. Es ist eine Technik zur Verarbeitung von Informationen über zeitliche Änderungen der Temperaturunterschiede vorgeschlagen, die während des Experiments aufgezeichnet worden sind. Temperaturunterschiede haben die Form von Array-Elementen und entsprechen bestimmten Werten von Zeitpunkten. Der Einsatz der Technik ermöglicht es, die Messfehler der thermophysikalischen Eigenschaften des Materials zu reduzieren.

Algorithme du traitement d'un grand nombre de données expérimentales lors de la mesure des propriétés thermiques des matériaux par la méthode de la source de chaleur pulsée plate

Résumé: Est réalisée une simulation mathématique du processus de transfert de chaleur dans un échantillon de matériau par la méthode de la source d'impulsion plate. Est proposée une méthode de traitement des informations sur un changement dans le temps des différences de température enregistrées au cours de l'expérience. Les différences de température sont des éléments d'un tableau et correspondent à des valeurs de moments spécifiques. L'utilisation de la technique permet de réduire les erreurs de mesure des caractéristiques thermiques du matériau.

Авторы: *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Баранов Сергей Сергеевич* – магистрант; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ

Ю. А. Смирнова✉, А. Н. Марьенков, Е. С. Тарабановская

*Кафедра информационных технологий; 2013qwer22@gmail.com;
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева»,
Астрахань, Россия*

Ключевые слова: база знаний; взаимодействие молекулярных систем; информационная поддержка; молекулярная система; производственные правила; цифровой двойник.

Аннотация: Проведен анализ проблемы подбора параметров при построении цифрового двойника процесса взаимодействия молекулярных систем. Цифровой двойник процесса взаимодействия молекулярных систем позволяет проводить компьютерное моделирование, в результате которого может быть получена сложная молекулярная система. Предложена новая методика анализа и обработки информации квантово-химических расчетов. Рассмотрены особенности, которые используются в процессе моделирования синтеза сложной молекулярной системы. Обоснована необходимость автоматизации процесса подбора параметров моделирования молекулярных взаимодействий. Дано описание производственных правил и параметров процесса моделирования взаимодействия между двумя молекулярными системами, составленных на основе предыдущих экспериментов. Представлена схема базы знаний на основе производственных правил для автоматизированной и информационной поддержки принятия решений при подборе геометрических параметров при взаимодействии молекулярных систем. Использование новой методики и формализованного описания знаний увеличило скорость подбора параметров при построении цифрового двойника процесса взаимодействия молекулярных систем и позволило значительно снизить время, затрачиваемое на моделирование.

Введение

В различных отраслях промышленности (фармацевтической, химической, нефтяной и др.) возникает задача моделирования процесса взаимодействия в сложных молекулярных системах (СМС) [1 – 3]. При этом взаимодействие между молекулярными системами (МС) обычно происходит за счет образования водородной связи. Атомы, между которыми образовалась связь, называются активными центрами (АЦ), которые определяют формирование структуры СМС. Моделирование процесса образования АЦ способствует более глубокому пониманию механизмов взаимодействий между молекулами, позволяет вести целенаправленный подбор ингибиторов, осуществлять поиск антидотов, выявлять новые свойства веществ и т.п.

Любое моделирование взаимодействия молекулярных систем предусматривает несколько этапов, на каждом из которых обрабатываются большие массивы разнородной и часто плохо структурированной информации.

На данный момент нет программных комплексов, позволяющих выполнять все этапы моделирования процесса образования сложной молекулярной структуры (взаимодействия молекулярных систем) и проводить поиск активных центров.

В качестве нового решения предлагается методика моделирования взаимодействия двух молекулярных систем, в которой используется подход на основе построения цифрового двойника процесса взаимодействия сложных молекулярных систем, основанный на комплексном учете физических и геометрических особенностей взаимодействия отдельных атомов между собой. Это позволяет выявить молекулярные комплексы, реализация которых потенциально (физически) возможна. При этом предлагается сохранять полученные результаты правил взаимодействия в специализированную базу знаний, представленную в виде продукционных правил. Полученная база знаний может быть использована для дальнейшего ретроспективного поиска, что, в свою очередь, позволяет сократить время расчетов при исследовании других молекулярных структур.

Методика моделирования взаимодействия двух молекулярных систем

Разработанная методика моделирования взаимодействия двух молекулярных систем разбита на несколько этапов.

Этап 1. Составление формализованного компьютерного представления взаимодействующих молекул.

Наиболее распространенным способом записи модели молекулы в виде формализованного компьютерного представления является Z -матрица. [4] Общая структура матрицы предоставлена в формуле (1). Поскольку существующие программные комплексы формируют Z -матрицы в различных, не совместимых между собой форматах, необходимо осуществлять их трансформирование к единому виду. Для этого предлагается использовать методику, подробное описание которой приведено в [5, 6].

$$\begin{array}{ccccccc}
 & A_1^1 & & & & & \\
 & A_2^1 & 1 & R_1 & & & \\
 & A_3^1 & 2 & R_2 & 1 & \alpha_1 & \\
 Z = & A_i^1 & 3 & R_3 & 2 & \alpha_2 & 1 \quad \varphi_2, \\
 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 & A_N^1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots
 \end{array} \quad (1)$$

где A_i – элемент системы (имя химического элемента); i – порядковый номер элемента системы; R – межатомное расстояние; α – валентный угол, образуемый между элементами системы; φ – двугранный угол, образованный плоскостями.

Каждому атому присваивается порядковый номер в данной n -атомной системе.

Этап 2. Составление описания взаимодействия двух молекулярных систем в виде формализованного компьютерного представления.

При составлении моделирования взаимодействия двух молекулярных систем необходимо описать СМС в виде формализованного компьютерного представления. Для этого необходимо:

– представить обе МС в виде формализованного компьютерного представления (матрицы Z^1, Z^2);

– составить множество $S_{\text{ПАЦ}}$ потенциальных активных центров (ПАЦ) – множество атомов, благодаря которым может образовываться взаимодействие между двумя молекулами (так называемая водородная связь).

Теоретически образовывать водородную связь могут семь атомов: F, O, N, Cl, Br, I, S, с одной стороны, и атом H – с другой [7]. Представим данную закономерность в виде

$$S_{\text{ПАЦ}} = \left\{ (A_i^1; A_j^2) : \left((A_i^1 \in Z^1) \wedge (A_j^2 \in Z^2) \right) \wedge \left((A_i^1 \in P) \wedge (A_j^2 = "H") \vee (A_i^1 = "H") \wedge (A_j^2 \in P) \right) \right\}, \quad (2)$$

где $P = \{F, O, N, Cl, Br, I, S\}$; A_i^1, A_j^2 – элементы MC 1 и 2.

Рассмотрим две MC: Z^1 – метионин (Рис. 1); Z^2 – сероводород (рис. 2).

C1						
C2	1	1.5186140				
C3	2	1.5340750	1	111.2014360		
C4	3	1.5252350	2	110.5401710	1	174.9682980
O5	4	1.2152150	3	130.0241350	2	20.8571100
O6	4	1.3556200	3	114.1199110	2	-158.6421060
S7	1	1.8164050	2	114.4939880	3	179.7066990
N8	3	1.4902510	2	110.9152130	1	-66.4332480
C9	7	1.8011660	1	103.4413400	2	-70.1524300
H10	1	1.1106040	2	109.6160820	3	54.7453370
H11	1	1.1075660	2	110.5641190	3	-61.9796200
H12	2	1.1106310	1	110.3317330	7	56.9968860
H13	2	1.1088000	1	110.1141170	7	-59.0067480
H14	3	1.1234060	2	108.3284490	1	56.7270020
H15	6	0.9522030	4	110.0332860	3	-178.2539870
H16	8	0.9968260	3	109.7776820	2	163.5946980
H17	8	1.0023940	3	108.3584150	2	43.4730650
H18	9	1.0964390	7	113.1142260	1	63.3085140
H19	9	1.0957600	7	112.8961170	1	-59.0607460
H20	9	1.0968890	7	107.4514730	1	-177.8927980

Рис. 1. Формализованное компьютерное представление молекулы «метионин»

S1		
H2	1	1.290404
H3	1	1.290393 2 93.512189

Рис. 2. Формализованное компьютерное представление молекулы «сероводород»

На основе данных MC формируется список ПАЦ взаимодействия «метионин – сероводород»

$$S_{\text{ПАЦ}} = [H_2O_4; H_2O_5; H_2O_6; H_3O_4; H_3O_5; H_3O_6; S_1H_8; S_1H_9; S_1H_{10}; S_1H_{11}; S_1H_{12}; S_1H_{13}]. \quad (3)$$

Этап 3. Подбор параметров описания сложной молекулярной системы.

1. Трансформировать структуры MC Z^2 [8]. Чтобы установить соединение между конкретными элементами двух MC, необходимо MC Z^2 трансформировать так, чтобы в первой строке матрицы стоял элемент, с которым устанавливается связь. Поскольку все элементы системы связаны с другими элементами, то для более эффективной и быстрой работы с элементами предлагается представить

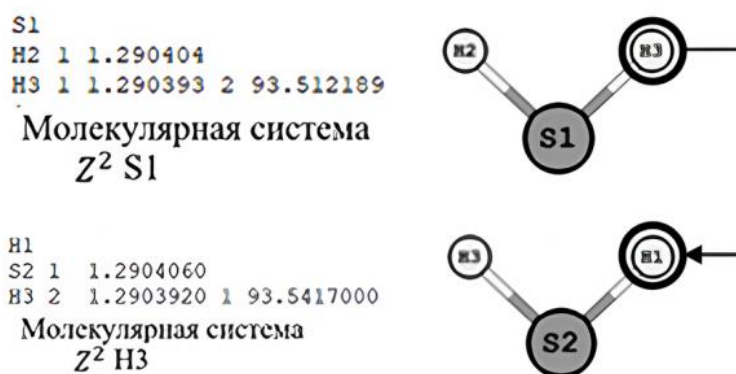


Рис. 3. Трансформация молекулярного графа сероводорода

данную связанную последовательность в виде молекулярного графа. Под трансформацией молекулярного графа будем считать его перестроение, начиная с новой вершины. На основе трансформированного графа формируется новое формализованное описание МС относительно нужного элемента.

На рисунке 3 представлена трансформация молекулярного графа молекулы сероводорода.

2. Объединить две молекулярные системы относительно каждого ПАЦ

$$Z_n^{\text{new}} = \left\{ \left(Z^1 \cup Z^2 \right) \right\}, \quad (4)$$

где

$$\begin{cases} A_i^1 \in Z^1; \\ A_j^2 \in Z^2; \\ (A_i^1; A_j^2) \in S. \end{cases} \quad (5)$$

Приведем общую структуру СМС

$$Z_n^{\text{new}} = \begin{matrix} Z_a^1 \\ Z_b^1 \\ Z_c^1 \\ Z_i^1 \\ Z_d^2 \\ Z_e^2 \\ Z_t^2 \\ Z_j^2 \end{matrix} = \begin{matrix} & a & R_{Z_a^1 Z_b^1} \\ & b & R_{Z_a^1 Z_b^1} & a & \alpha_{Z_a^1 Z_c^1} \\ & c & R_{Z_b^1 Z_c^1} & b & \alpha_{Z_b^1 Z_c^1} & a & \varphi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1} \\ & d & R_{Z_d^2 Z_e^2} \\ & e & R_{Z_e^2 Z_t^2} & a & \alpha_{Z_d^2 Z_e^2} \\ & t & R_{Z_t^2 Z_j^2} & b & \alpha_{Z_e^2 Z_t^2} & a & \varphi_{Z_j^2 Z_d^2 Z_e^2} \end{matrix} \quad (6)$$

3. Подобрать параметры присоединения. Один из главных этапов в процессе составления СМС – описание геометрических параметров устойчивого состояния. Приведем общую структуру СМС с параметрами

$$Z_n^{\text{new}} = \begin{matrix} Z_a^1 \\ Z_b^1 \\ Z_c^1 \\ Z_i^1 \\ Z_{d+i}^2 \\ Z_{e+i}^2 \\ Z_{t+i}^2 \\ Z_{j+i}^2 \end{matrix} = \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ A_{\text{ПАЦ}}^1 \\ d \\ e \\ t \end{matrix} \begin{matrix} R_{Z_a^1 Z_b^1} \\ R_{Z_a^1 Z_b^1} \\ R_{Z_b^1 Z_c^1} \\ R_1 \\ R_{Z_d^2 Z_e^2} \\ R_{Z_e^2 Z_t^2} \\ R_{Z_t^2 Z_j^2} \end{matrix} \begin{matrix} a \\ b \\ A_{i+1}^1 \\ A_{i+2}^1 \\ A_{i+1}^1 \\ a \\ b \end{matrix} \begin{matrix} \alpha_{Z_a^1 Z_c^1} \\ \alpha_{Z_b^1 Z_c^1} \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_{Z_d^2 Z_e^2} \\ \alpha_{Z_e^2 Z_t^2} \end{matrix} \begin{matrix} a \\ \phi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1} \\ A_{i+2}^1 \\ A_{i+1}^1 \\ A_{\text{ПАЦ}}^1 \\ a \end{matrix} \begin{matrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_{Z_j^2 Z_d^2 Z_e^2} \end{matrix}, \quad (7)$$

где Z_a^1, Z_b^2 – две Z -матрицы (системы); A_i^1, A_j^2 – пара элементов; $A_{\text{ПАЦ}}^1$ – ПАЦ МС Z^1 ; A_{i+1}^1, A_{i+2}^1 – элемент, связанный с $A_{\text{ПАЦ}}^1$ в МС Z^1 ; $R_{Z_a^1 Z_b^1}$ – расстояние водородной связи; $\alpha_{Z_a^1 Z_c^1}$ – валентный угол; $\phi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}$ – плоскостной угол.

Рассмотрим каждый критерий более подробно:

1) $R_{Z_a^1 Z_b^1}$.

С помощью ван-дер-ваальсовых радиусов рассчитаем расстояние, на которое физически могут сблизиться атомы:

$$R_{\text{опт}} = \{ \text{F} - \text{H} \in [1, 2 \dots 2, 56], \text{O} - \text{H} \in [1, 2 \dots 2, 56], \text{N} - \text{H} \in [1, 2 \dots 2, 77], \\ \text{Cl} - \text{H} \in [1, 2 \dots 3, 00], \text{Br} - \text{H} \in [1, 2 \dots 3, 15], \text{I} - \text{H} \in [1, 2 \dots 3, 35], \\ \text{S} - \text{H} \in [1, 2 \dots 3, 05] \}. \quad (8)$$

2) $\alpha_{Z_a^1 Z_c^1}$

$$\alpha_{\text{опт}} = [45, 55, 75, 85, 95, 120, 150, 180, 210, 240, 280]; \quad (9)$$

3) $\phi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}$

$$-180^\circ \leq \phi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1} \leq 180^\circ. \quad (10)$$

Таким образом, описание геометрических параметров устойчивого состояния СМС, а именно подбор параметров, может быть представлен следующей формулой:

$$Z_n^{\text{new}} = (Z^1 \cup Z^2): \left((A_i^1; A_j^2) \in S, R_{A_i^1, A_j^2} \in R_{\text{опт}}, \alpha_{A_i^1, A_j^2} \in \alpha_{\text{опт}} \right). \quad (11)$$

Для составления СМС необходимо перебирать все возможные варианты определения критериев (параметров). Например, если рассматривать взаимодействие между атомами фтора и водорода, то расстояние водородной связи между этими элементами от 1,2 до 2,56 согласно (8).

Тогда необходимо для параметра $R_{A_i^1 A_j^2}$ рассмотреть значение связи 1,2, а для параметра $\alpha_{A_i^1 A_j^2}$ подставлять последовательно значения согласно (9):

- 1 вариант – $R_{A_1^1 A_1^2} - 1,2$; $\alpha_{A_1^1 A_1^2} - 45$;
 2 вариант – $R_{A_1^1 A_1^2} - 1,2$; $\alpha_{A_1^1 A_1^2} - 55$;

 11 вариант – $R_{A_1^1 A_1^2} - 1,2$; $\alpha_{A_1^1 A_1^2} - 280$.

Таким образом, получается 11 вариантов (комбинаций). Каждую комбинацию необходимо проверить на модель существования, используя стороннюю программу квантово-химических расчетов. Если квантово-химический расчет не прошел, то такая реализация потенциально (физически) невозможна. Поэтому необходимо увеличить $R_{A_1^1 A_1^2}$ на 0,01 и повторить перебор углов.

Тогда число комбинаций возможного взаимодействия между фтором и водородом составит 319. Поскольку для построения цифрового двойника процесса взаимодействия МС необходимо перебрать большое число параметров, влияющих на условия формирования СМС, вычислительная сложность алгоритма при прямом переборе возрастает настолько, что процесс построения цифрового двойника может занимать от нескольких часов до нескольких дней. Ускорить построение цифрового двойника процесса взаимодействия МС можно за счет использования ранее полученной информации о подобранных параметрах. Если в случае моделирования новой молекулярной структуры в качестве основной Z^1 рассматривается система, для которой уже проведен подбор параметров, то можно использовать имеющуюся информацию прошлых экспериментов, за счет чего сокращается время подбора новых параметров.

Для этого разработана система поддержки принятия решений на основе базы продукционных правил (БПП) [9], где хранятся правила, описывающие условия, при которых возможно формирование СМС из числа ранее рассмотренных МС. Общая схема использования БПП для информационной поддержки принятия решений при подборе параметров моделирования СМС представлена на рис. 4.

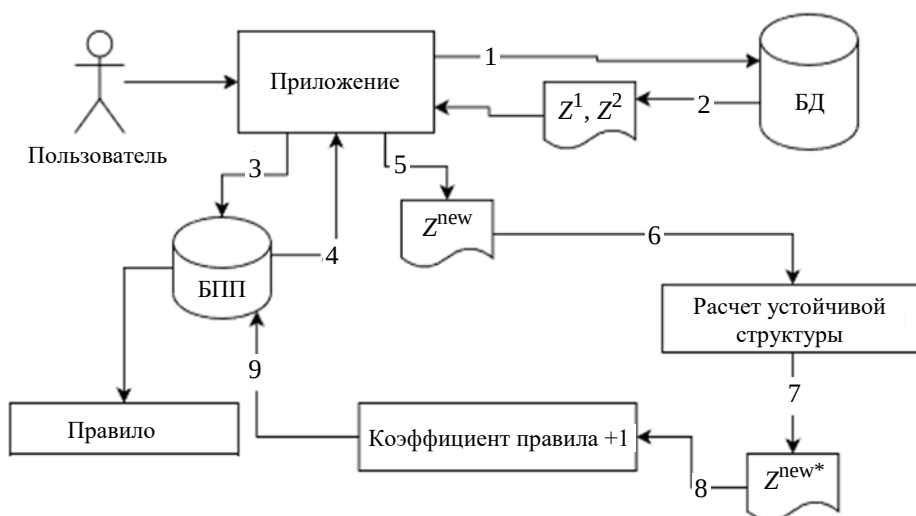


Рис. 4. Общая схема использования БПП для информационной поддержки принятия решений при подборе параметров моделирования сложной молекулярной системы

Приведем алгоритм использования БПП для информационной поддержки принятия решений при подборе параметров моделирования СМС:

Шаг 1. Пользователь посылает на вход приложения название двух МС (Z^1, Z^2).

Шаг 2. Приложение подает запрос в базу данных (БД). База данных, согласно запросу, возвращает две описанные структуры каждой МС в отдельных кортежах.

Шаг 3. Приложение принимает кортежи и передает запрос в БПП: если молекулярная система Z^1 проходила расчет взаимодействия и элемент A_i^1 являлся активным центром, то из БПП берутся показатели предыдущих расчетов

$$P = \left\{ R_{A_i^1}; A_{\text{ПАЦ}}^1; \alpha_{A_i^1}; A_i^1; \varphi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}; A_j^1; A_{i+1}^1; \alpha_{A_{i+1}^2}; A_{j+1}^1; \right. \\ \left. \varphi_{Z_{i+1}^1 Z_{a+1}^1 Z_{b+1}^1}; A_{i+2}^1; \varphi_{Z_{i+2}^1 Z_{a+2}^1 Z_{b+2}^1}; k \right\}, \quad (12)$$

где $R_{A_i^1}$ – расстояние водородной связи; $A_{\text{ПАЦ}}^1$ – потенциально активный центр основной молекулярной системы; $\alpha_{A_i^1}$ – валентный угол; $\varphi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}$ – плоскостной угол; $A_i^1, A_j^1, A_{i+1}^1, A_{j+1}^1, A_{i+2}^1$ – элементы, связанные с $A_{\text{ПАЦ}}^1$; $\alpha_{A_{i+1}^2}$ – валентный угол между вторым атомом МС присоединения и атомом основной МС; $\varphi_{Z_{i+1}^1 Z_{a+1}^1 Z_{b+1}^1}$ – плоскостной угол между вторым атомом МС присоединения и атомами основной МС; $\varphi_{Z_{i+2}^1 Z_{a+2}^1 Z_{b+2}^1}$ – плоскостной угол между третьим атомом МС присоединения и атомами основной МС; k – коэффициент правила.

При этом, если подходящее правило обнаружено и таких правил несколько, то выбирается то, которое имеет наиболее высокий коэффициент (коэффициент представляется на основе частоты успешного использования данного правила). База продукционных правил возвращает правило.

Шаг 4. На основе правила составляется сложная молекулярная система.

Шаг 5. Происходит расчет устойчивой структуры с использованием сторонней квантово-химической программы. Проверяется образование СМС.

Шаг 6. Выгружается устойчивая структура СМС.

Шаг 7. Для использованного правила увеличивается его коэффициент.

Шаг 8. Коэффициент добавляется в БПП.

Если подходящее правило в БПП не найдено, то алгоритм продолжает подбирать параметры прямым перебором и, в случае успеха, добавляет в БПП найденные параметры в качестве нового правила.

Рассмотрим пример заполнения БПП параметрами моделирования процесса взаимодействия на примере взаимодействия метионина с лецитином:

- лецитин-система, состоящая из 46 элементов (атомов);
- метионин-система, состоящая из 20 элементов (атомов).

При полном переборе без использования предлагаемой методики необходимо было бы проверять 920 предполагаемых соединений. С использованием методики, согласно (1), исключаются 725 и остается проверить 195 предполагаемых соединений. После составления всех возможных объединений (взаимодействий) получено: 126 сложных молекулярных систем; 22 активных центра; 22 новых правила для БПП. Так как ни одно правило из БПП не подошло для расчета из-за того, что

молекулярная система «лецитин» не была рассчитана ранее, то для подбора геометрических параметров используется прямой перебор, а найденные параметры добавляются в качестве нового правила. Моделирование проводилось 18 ч.

Проверка работы правил

Для построения цифрового двойника процесса взаимодействия молекулярных систем использованы МС лецитина и сероводорода:

- лецитин-система, состоящая из 46 элементов (атомов);
- сероводород-система, состоящая из трех элементов (атомов).

При полном переборе без использования методики необходимо проверить 138 предполагаемых соединений. С использованием методики, согласно (1), исключаются 96 предполагаемых соединений и остается проверить 42. После составления всех возможных объединений (взаимодействий) получено: 30 сложных молекулярных систем; 30 активных центров; 10 новых правил для БПП. В ходе моделирования применено 20 правил. Моделирование проводилось 5 ч.

Заключение

Таким образом, в работе представлена новая методика построения цифрового двойника процесса взаимодействия молекулярных систем, в основе которой используется цифровой двойник процесса взаимодействия молекулярных систем с применением продукционных правил. Практическая значимость полученных результатов заключается в эффективном практическом применении разработанного на основе предложенной методики программного обеспечения. Проведенный эксперимент по моделированию СМС с применением предложенной методики, использующей продукционные правила, и методики на основе прямого перебора показал, что новая методика позволила значительно сократить время на моделирование СМС, поскольку при проведении второго эксперимента использовались результаты, полученные ранее из первого эксперимента. Данную методику и разработанный на ее основе программный комплекс можно использовать как один из этапов при поиске активных центров межмолекулярных взаимодействий.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. Золотарева, Н. В. Основы квантовой механики в вопросах и задачах. Модельные примеры квантовой химии : учеб.-метод. пособие / Н. В. Золотарева. – Астрахань : Изд-во Сорокина Р. В., 2020. – 58 с.
2. Климов, В. В. Основы квантово-химического анализа : метод. указания к лабораторным работам. Часть 1 / В. В. Климов, Т. П. Алейникова, В. А. Козловцев. – Волгоград : Изд-во Волгоград. гос. тех. ун-та, 2017. – 32 с.
3. Золотарева, Н. В. Численные методы анализа в химии для студентов, обучающихся по химическим направлениям и педагогическим направлениям с двумя профилями подготовки очной и очно-заочной форм обучения : учеб. пособие / Н. В. Золотарева. – Астрахань : Изд-во Сорокина Р. В., 2020. – 78 с.
4. Аликберова, Л. Ю. Основы строения вещества : метод. пособие. – Текст: электронный / Л. Ю. Аликберова, Е. В. Савинкина, М. Н. Давыдова. – М. : МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2004. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
5. Смирнова, Ю. А. Разработка алгоритма и метода трансформации записи атомно-молекулярных систем / Ю. А. Смирнова, Л. И. Головацкая // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 2(58). – С. 61 – 67.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022614450 Российская Федерация. ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ «TFinG» / Ю. А. Смирнова, Л. И. Головацкая ; заявитель ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». – № 2022613564 ; заявл. 15.03.2022 ; опубл. 22.03.2022. – 1 с.

7. Тараскин, Д. В. Структура программного обеспечения для выявления потенциальных активных центров между двумя молекулами / Д. В. Тараскин, Л. И. Жарких // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 12. – С. 117 – 121.

8. Смирнова, Ю. А. Особенности программной реализации методики трансформации молекулярных систем / Ю. А. Смирнова, А. Н. Марьенков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 4(43). – 13 с. doi: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.023

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023669622 Российская Федерация. Система поддержки принятия решений геометрических параметров для составления сложных молекулярных систем / Ю. А. Смирнова, А. Н. Марьенков, Е. С. Тарабановская. – № 2023668546 ; заявл. 06.09.2023 ; опубл. 18.09.2023. – 1 с.

Using a Knowledge Base to Build a Digital Twin of the Process of Interaction between Molecular Systems

Yu. A. Smirnova✉, A. N. Maryenkov, E. S. Tarabanovskaya

Department of Information Technologies, 2013qwer22@gmail.com;
Astrakhan State University named after V. N. Tatishchev, Astrakhan, Russia

Keywords: knowledge base; interaction of molecular systems; information support; molecular system; production rules; digital twin.

Abstract: A digital twin of the process of interaction of molecular systems allows for computer simulation, as a result of which a complex molecular system can be obtained. The production rules and parameters of the process of modeling the interaction between two molecular systems, compiled on the basis of previous experiments, are described. The use of a new technique and a formalized description of knowledge increased the speed of selecting parameters when constructing a digital twin of the process of interaction of molecular systems and made it possible to significantly reduce the time spent on modeling. A diagram of the knowledge base based on production rules is presented for automated and informational support for decision-making in the selection of geometric parameters during the interaction of molecular systems. Conclusions are drawn about the effectiveness of the developed methodology for selecting geometric parameters when compiling a complex molecular system using production rules.

References

1. Zolotareva N.V. *Osnovy kvantovoy mekhaniki v voprosakh i zadachakh. Model'nyye primery kvantovoy khimii* [Fundamentals of quantum mechanics in questions and problems. Model examples of quantum chemistry], Astrakhan: Izdatel'stvo Sorokina R.V., 2020, 58 p. (In Russ.)

2. Klimov V.V., Aleynikova T.P., Kozlovtssev V.A. *Osnovy kvantovokhimicheskogo analiza* [Fundamentals of quantum chemical analysis], Part 1, Volgograd: Izdatel'stvo Volgograd. gos. tekhn. universiteta, 2017, 32 p. (In Russ.)

3. Zolotareva N.V. *Chislennyye metody analiza v khimii dlya studentov, obuchayushchikhsya po khimicheskim napravleniyam i pedagogicheskim napravleniyam s dvumya profilyami podgotovki ochnoy i ochno-zaochnoy form obucheniya* [Numerical methods of analysis in chemistry for students studying in chemical fields and pedagogical fields with two profiles of training full-time and part-time forms of study], Astrakhan': Izdatel'stvo Sorokina R.V., 2020, 78 p. (In Russ.)
4. Alikberova L.Yu., Savinkina Ye.V., Davydova M.N. *Osnovy stroyeniya veshchestva* [Fundamentals of the structure of matter], Moscow: MITKHT im. M. V. Lomonosova, 2004, 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). (In Russ.)
5. Smirnova Yu.A., Golovatskaya L.I. [Development of an algorithm and method for transforming the recording of atomic-molecular systems], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies.], 2022, no. 2(58), pp. 61-67. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Smirnova Yu.A., Golovatskaya L.I. *PROGRAMMA DLYA EVM "TFinG"* [COMPUTER PROGRAM "TFinG"], Russian Federation, 2022, Certificate 2022614450 (In Russ.)
7. Taraskin D.V., Zharkikh L.I. [Structure of software for identifying potential active centers between two molecules], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, vol. 22, no. 12, pp. 117-121. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Smirnova Yu.A., Mar'yenkov A.N. [Features of software implementation of the methodology for transforming molecular systems], *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2023, vol. 11, no. 4(43), 13 p. doi: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.023 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Smirnova Yu.A., Mar'yenkov A.N., Tarabanovskaya Ye.S. *Sistema podderzhki prinyatiya resheniy geometricheskikh parametrov dlya sostavleniya slozhnykh molekulyarnykh sistem* [Geometric decision support system for composing complex molecular systems], Russian Federation, 2023, Certificate 2023669622 (In Russ.)

Nutzung der Wissensbasis für die Konstruktion des digitalen Zwillings des Interaktionsprozesses molekularer Systeme

Zusammenfassung: Das Problem der Parameterauswahl bei der Konstruktion eines digitalen Zwillings des Interaktionsprozesses molekularer Systeme ist analysiert. Der digitale Zwilling des Wechselwirkungsprozesses molekularer Systeme ermöglicht eine Computermodellierung, aus der ein komplexes molekulares System hervorgehen kann. Es ist eine neue Technik zur Analyse und Verarbeitung von Informationen aus quantenchemischen Berechnungen vorgeschlagen. Die Merkmale, die bei der Modellierung der Synthese eines komplexen molekularen Systems verwendet werden, sind betrachtet. Die Notwendigkeit der Automatisierung des Prozesses der Auswahl von Parametern für die Modellierung molekularer Wechselwirkungen ist begründet. Es ist die Beschreibung der Produktregeln und Parameter des Prozesses der Modellierung der Wechselwirkung zwischen zwei molekularen Systemen gegeben, die auf der Grundlage früherer Experimente erstellt worden sind. Das Schema der Wissensbasis auf der Grundlage der Produktionsregeln für die automatisierte und informationelle Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Auswahl der geometrischen Parameter bei der Wechselwirkung molekularer Systeme ist vorgestellt. Die Verwendung der neuen Methodik und der formalisierten Wissensbeschreibung hat die Geschwindigkeit der Parameterauswahl bei der Konstruktion eines digitalen Zwillings des Interaktionsprozesses molekularer Systeme erhöht und die für die Modellierung aufgewendete Zeit erheblich reduziert.

Utilisation de la base de connaissances dans la construction du double numérique du processus d'interaction des systèmes moléculaires

Résumé: Est effectuée l'analyse du problème de la sélection des paramètres lors de la construction d'un double numérique du processus d'interaction des systèmes moléculaires. Le double numérique du processus d'interaction des systèmes moléculaires permet la modélisation informatique, à la suite de laquelle un système moléculaire complexe peut être obtenu. Est proposée une nouvelle méthode d'analyse et de traitement de l'information des calculs chimiques quantiques. Sont examinées les caractéristiques utilisées dans la modélisation de la synthèse d'un système moléculaire complexe. Est justifiée la nécessité d'automatiser le processus de sélection des paramètres de modélisation des interactions moléculaires. Sont décrits les règles de la production et les paramètres du processus de modélisation des interactions entre les deux systèmes moléculaires établis à partir des expériences précédentes. Est présenté un schéma de la base de connaissances sur la base des règles de procédure pour l'aide à la décision automatisée et informatisée lors de la sélection de paramètres géométriques dans l'interaction des systèmes moléculaires. L'utilisation d'une nouvelle technique et d'une description formalisée des connaissances a augmenté la vitesse de la sélection des paramètres lors de la construction d'un double numérique du processus d'interaction des systèmes moléculaires et a permis de réduire considérablement le temps nécessaire à la modélisation.

Авторы: *Смирнова Юлия Александровна* – старший преподаватель кафедры информационных технологий; *Марьенков Александр Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных технологий; *Тарабановская Екатерина Сергеевна* – студент, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева», Астрахань, Россия.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ И КИСЛОРОДА В РЫБОРАЗВОДНЫХ ПРУДОВЫХ ХОЗЯЙСТВАХ

Ю. А. Головки^{1✉}, С. В. Головки²

Кафедра информационных технологий (1), pjulia2014@yandex.ru;

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный

университет им. В. Н. Татищева»; Астрахань, Россия

кафедра «Электрооборудование и автоматика судов» (2),

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,

Астрахань, Россия

Ключевые слова: автоматизированное проектирование; концентрация кислорода; повышение эффективности; программно-аппаратный комплекс; прудовые хозяйства; уровень воды.

Аннотация: Рассмотрен системный подход к повышению эффективности работы установок замкнутого водоснабжения (УЗВ) в рыбоводящих хозяйствах. Сделан вывод, что для достижения поставленной цели, необходимо расширить и автоматизировать функционал УЗВ, внедрив современные информационные технологии. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволит автономно контролировать оптимальные условия для выращивания рыбы, исключить возникновение нештатных ситуаций, приводящих к ее морю, и значительно снизить затраты на электрическую энергию.

Введение

За последние десятилетия запасы рыбного продовольствия сильно сократились. Это связано с нерациональным использованием природных ресурсов, браконьерством, техногенным и естественным обмелением рек. Для сохранения и приумножения рыбных запасов, появилась необходимость в создании рыбоводных хозяйств. Деятельность таких предприятий позволит обеспечить население нашей страны качественной и доступной продукцией и повысить импортозамещение.

Продолжительность роста рыбы напрямую зависит от температуры окружающей среды, уровня кислорода в воде и условий содержания. Из этого можно сделать вывод, что скорость выращивания рыбы в природных водоемах значительно ниже, чем в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ). Однако существует вероятность возникновения нештатных ситуаций, зависящих как от человеческого фактора, так и от технического состояния системы контроля за жизненно важными параметрами для выращивания рыбы [1, 2].

В соответствии с Постановлением правительства РФ от 17 июня 2015 г. № 600 «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности» разрабатываемый программно-аппаратный комплекс (ПАК) решит проблему сокращения потребления электроэнергии при работе установки в определенном режиме, избегая

бесконтрольной эксплуатации насосных установок. Это позволит увеличить срок работы оборудования и сократить дополнительные расходы на ремонт и покупку нового [3, 4].

Структурное и функциональное проектирование программно-аппаратного комплекса

Разработанный ПАК предназначен для непрерывной и автономной работы. Он берет на себя такие функции, как управление насосными установками, контроль оптимальной температуры воды, предоставление данных оператору с установленных датчиков и оповещение о возникновении аварийного состояния и низком уровне воды. Для нормальной работы ПАК необходимо удостовериться, что все датчики (кислорода, температуры, уровня воды) установлены в соответствии с их характеристиками и требованиями по эксплуатации.

Получение информации об уровне воды, концентрации кислорода и температуре происходит при помощи соответствующих датчиков и передается на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. Функция дополнительного оповещения об аварийных ситуациях в системе выполняется с помощью установки GSM/GPRS-модуля.

На рисунке 1 представлено взаимодействие микроконтроллера с комплектующими, входящими в состав ПАК. Микроконтроллер является главным элементом ПАК, используется для сбора данных с датчиков, приема и отправления sms-сообщений при помощи GSM/GPRS-модуля и осуществляет управление внешними устройствами.

Данные с датчиков (температуры, кислорода и уровня воды) передаются на микроконтроллер, затем на дисплей АРМ в целях отслеживания текущего состояния оператором. Микроконтроллер подает сигнал о работе насоса, аэратора и нагревательного элемента в зависимости от полученных данных. При отсутствии сигнала с какого-либо датчика включается аварийный режим системы управления.

Общая функциональная схема ПАК, в которой продемонстрированы все основные блоки и протоколы передачи информации между ними, показана на рис. 2.

При разработке ПАК также учтены следующие программно-технические решения:

- предельное время ожидания ответа оператора – не более 30 с;
- вероятность потери информационного сообщения – не более 0,1 %;
- устойчивость к сетевым перегрузкам;
- возможность дальнейшего развития ПАК в направлении расширения функционала, производительности, масштабируемости существующих функций.



Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

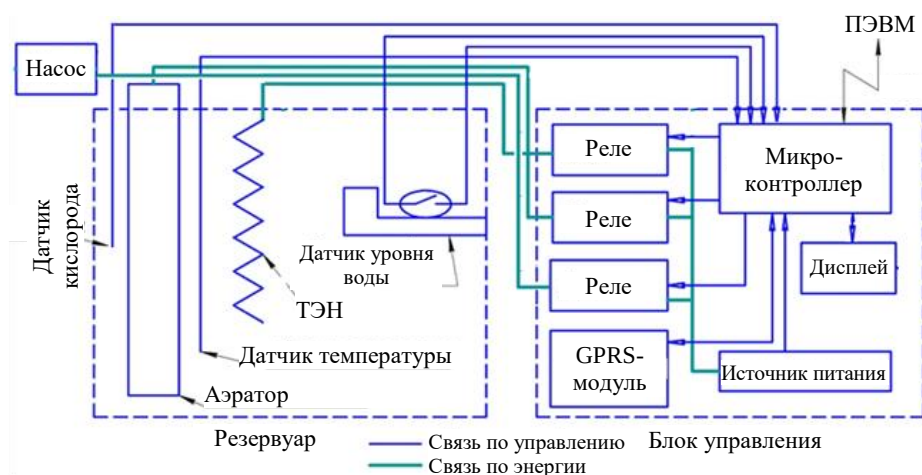


Рис. 2. Функциональная схема программно-аппаратного комплекса

Срок эксплуатации ПАК определяется сроком устойчивой работы аппаратных средств вычислительных комплексов, своевременным проведением работ по замене (обновлению) аппаратных средств, сопровождению программного обеспечения ПАК и его модернизации.

Разработка программы и интерфейса для мониторинга системы

В основе программного обеспечения ПАК лежит следующий алгоритм работы микроконтроллера (рис. 3). На первом этапе контроллер опрашивает датчики и сравнивает их показания с допустимыми значениями. Если уровень воды ниже заданного значения, то контроллер подает сигнал на запуск водяного насоса, который работает до тех пор, пока резервуар не заполнится до рекомендованного объема. Если вода в резервуаре находится на достаточном уровне, тогда система проверяет значения кислорода в воде и температуры. В случае, когда кислород находится в нормально допустимом диапазоне (8,3...9,2 мг/л), аэратор выключен. При снижении уровня допустимой концентрации кислорода, контроллер запускает аэратор до тех пор, пока уровень кислорода в воде не придет в норму [5].

Если температура воды повышается до 26 °С, тогда в независимости от уровня кислорода включается аэратор, так как это позволит снизить ее показания на несколько градусов. Если температура достигает значений ниже 20 °С, то включается водонагреватель.

На автоматизированном рабочем месте оператора будет отображаться весь протекающий процесс в УЗВ, а также данные, полученные с датчиков. Программа АРМ использует библиотеки `pySerial` для работы с последовательным портом и `Tkinter` для создания интерфейса (рис. 4).

Код написан на языке `Arduino C`, который основан на `C/C++`, в среде разработки `Arduino IDE`. Программа представляет собой цельный скрипт, предназначенный для микроконтроллера на печатной плате. Для работы с датчиками и другими дополнительными модулями использованы соответствующие библиотеки: `SoftwareSerial`, `Dallas Temperature`, `OneWire`, `LCD_1602_RUS`. В качестве платформы для ПАК выбран контроллер `Arduino UNO`.

Для `Arduino` используем библиотеку `SoftwareSerial`, которая эмулирует программную работу последовательного порта для связи с модулем `SIM900`. На `Arduino` уже присутствует аппаратный последовательный порт, но он не доступен для обмена данными с компьютером.

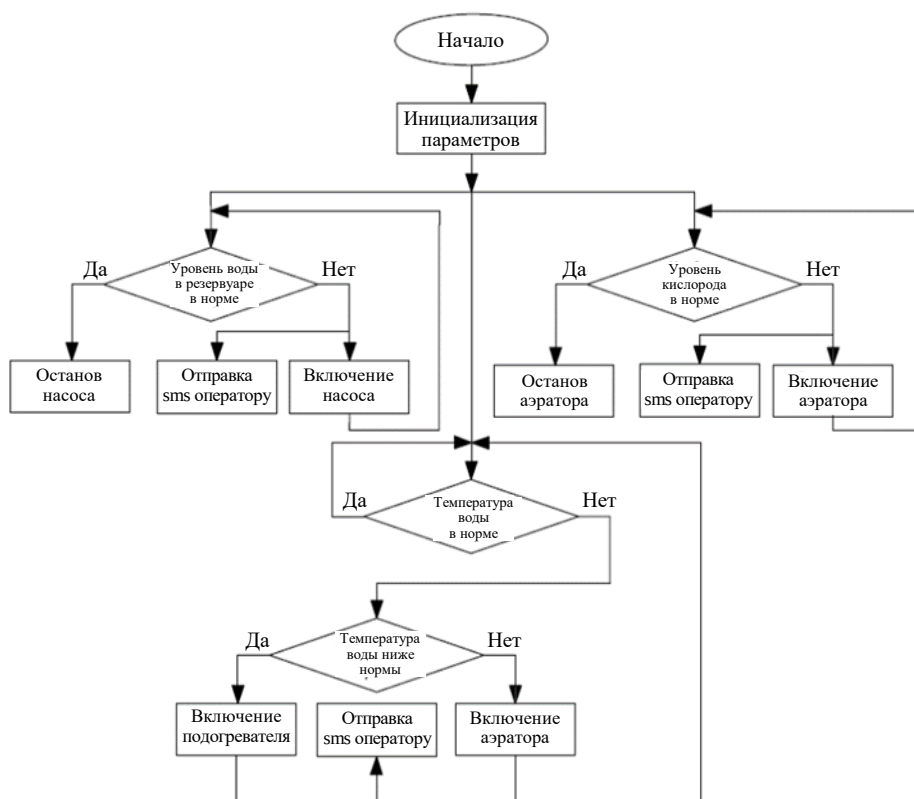


Рис. 3. Алгоритм работы программно-аппаратного комплекса

```

import tkinter as tk
from tkinter import ttk

sod = 21
temp = 20
serBufftr = ""

ser=serial.Serial('COM3',9600,timeout=0,parity=serial.Parity_EVEN,rtscts=1)
ser.open()

class App(tk.Tk):
    def __init__(self):
        super().__init__()

        self.title('PyControl')
        self.bg=["#ffffff"]
        self.geometry('1100x800')

        self.frame=tk.Frame(self,bg="ffffff")
        self.frame.pack(expand="true",fill="both")

```

Рис. 4. Фрагмент программного кода автоматизированного рабочего места оператора

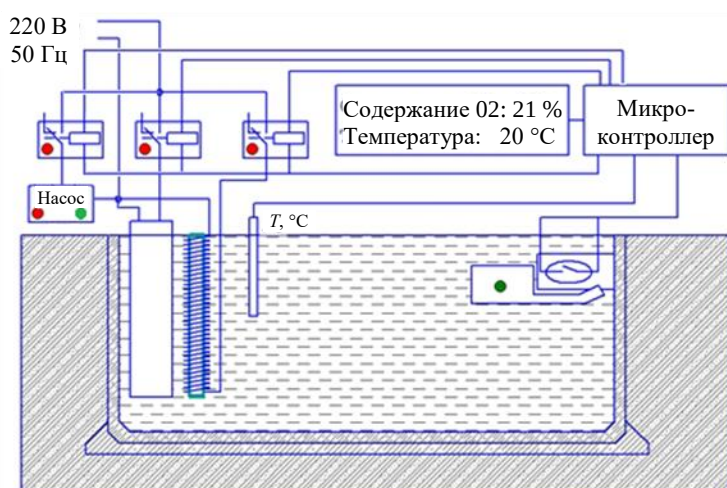


Рис. 5. Прототип интерфейса программно-аппаратного комплекса

Дополнительно используется библиотека для работы с датчиком температуры DallasTemperature. Она предполагает совместную работу с библиотекой OneWire, поэтому ее следует тоже подключить. Библиотека LCD_1602_RUS необходима для работы с дисплеем. Через данную библиотеку выводим полученную с датчиков информацию на дисплей.

Программа начинается с объявления переменных, инициализацией экземпляров и библиотек. Первая функция, которая запускается, – Setup. Здесь назначаются порты, настраивается последовательный порт и проводится проверка модуля связи, чтобы убедиться, что он подключен и исправен. Функция Loop – основное тело программы, она выполняется бесконечно, в ней постоянно идет опрос датчиков и обновление информации на дисплее.

Программа для микроконтроллера и АРМ связаны между собой, то есть при изменении параметров на микроконтроллере, это отобразится на АРМ и наоборот (рис. 5).

Заключение

Введение в эксплуатацию разработанного программно-аппаратного комплекса позволит существенно снизить потребление электрической энергии, увеличить срок службы оборудования и минимизировать риски, связанные с гибелью рыбы из-за непредвиденных ситуаций, и, как следствие, уменьшить себестоимость продукции.

Список литературы

1. Клепикова, С. Рыба под присмотром. Установки замкнутого водоснабжения помогут обеспечить Россию рыбой / С. Клепикова // Агротехника и технологии. – 2019. – URL : <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/31107-ryba-pod-prismotrom> (дата обращения: 06.03.2024).
2. Голушков, Н. А. Интегрированная платформа мониторинга водной среды прудового хозяйства / Н. А. Голушков, А. Г. Кокуев // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 1. – С. 57 – 63. doi: 10.24143/2073-5529-2023-1-57-63
3. Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности : постанов-

ление Правительства РФ от 17 июня 2015 г. № 600. – URL : <https://base.garant.ru/71095216/> (дата обращения: 06.03.2024).

4. Бурцев, И. А. Рекомендации по повышению эффективности искусственного воспроизводства осетровых видов рыб / И. А. Бурцев// Труды ВНИРО. – 2015. – Т. 153. – С. 165 – 174.

5. Иванов, А. А. Физиология рыб / А. А. Иванов. – М. : Мир, 2003. – 284 с.

Automated Complex for Monitoring and Controlling Water and Oxygen Levels in Fish Pond Farms

Yu. A. Golovko^{1✉}, S. V. Golovko²

*Department of Information Technologies (1), pjulia2014@yandex.ru;
Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan, Russia;
Department of Electrical Equipment and Automation of Ships (2);
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

Keywords: computer-aided design; oxygen concentration; efficiency improvement; pond farms; software and hardware complex; water level.

Abstract: A systematic approach to increasing the efficiency of recirculating water supply (RWS) installations in fishing farms is considered. It is concluded that in order to achieve this goal, it is necessary to expand and automate the RWS functionality by introducing modern information technologies. The developed software and hardware complex will make it possible to autonomously control the optimal conditions for growing fish, eliminate the occurrence of emergency situations leading to its death, and significantly reduce the cost of electrical energy.

References

1. available at: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/31107-ryba-pod-prismotrom> (accessed 06 March 2024).
2. Golushkov N.A., Kokuev A.G. [Integrated platform for monitoring the aquatic environment of a pond farm], *Integrirrovannaya platforma monitoringa vodnoy sredy prudovogo khozyaystva* [Bulletin of ASTU. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science], 2023, no. 1, pp. 57-63. doi: 10.24143/2073-5529-2023-1-57-63 (In Russ., abstract in Eng.)
3. available at: <https://base.garant.ru/71095216/> (accessed 06 March 2024).
4. Burtsev I.A. [Recommendations for increasing the efficiency of artificial reproduction of sturgeon species], *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2015, vol. 153, pp. 165-174. (In Russ.)
5. Ivanov A.A. *Fiziologiya ryb* [Physiology of fish], Moscow: Mir, 2003, 284 p. (In Russ.)

Automatisierter Überwachungskomplex und Kontrollsystem des Wasser- und Sauerstoffgehalts in Fischkulturteichfarmen

Zusammenfassung: Es ist ein Systemansatz zur Verbesserung der Effizienz von geschlossenen Wasserversorgungsanlagen (WVA) in Fischzuchtbetrieben betrachtet. Es ist festgestellt, dass es zur Erreichung des gesetzten Ziels notwendig ist, die Funktionalität der geschlossenen Wasserversorgungsanlagen durch die Einführung moderner

Informationstechnologien zu erweitern und zu automatisieren. Der entwickelte Hardware-Software-Komplex wird die autonome Steuerung optimaler Bedingungen für die Fischzucht ermöglichen, das Auftreten anormaler Situationen, die zur Fischsterbe führen, ausschließen und die Kosten für elektrische Energie erheblich senken.

Complexe automatisé de surveillance et de commande du niveau d'eau et d'oxygène dans les étangs de pisciculture

Résumé: Est examinée une approche systématique visant à améliorer l'efficacité des installations d'approvisionnement en eau fermée (AEF) dans les exploitations piscicoles. Est conclu que pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'élargir et d'automatiser la fonctionnalité de l'AEF en introduisant des technologies modernes d'information. Est élaboré le complexe logiciel et matériel qui permettra de contrôler de manière autonome les conditions optimales pour la culture du poisson, d'éliminer l'apparition de situations anormales conduisant à son mor et de réduire considérablement les coûts de l'énergie électrique.

Авторы: *Головко Юлия Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева», Астрахань, Россия; *Головко Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика судов», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Россия.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА С ДАЛЬНОМЕРНЫМ КАНАЛОМ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

А. И. Сустин✉, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк

*Кафедра «Радиотехника», sasasustin@mail.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая системы; оценка дальности; дальномерный канал; третичная обработка информации; весовая обработка информации; невязка дальности.

Аннотация: Для повышения точностных характеристик информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) с применением третичной обработки информации, выполняющих задачи диспетчерского сопровождения маневрирующих воздушных судов (ВС) в районе аэродрома, а также для повышения пропускной способности системы при сохранении заданного уровня безопасности предложена структура ИИУС с использованием метода весовой третичной обработки информации с апостериорными весовыми коэффициентами, учитывающим изменения невязки дальности до ВС на каждом шаге. Предложенная структура отличается наличием измерителей невязки дальности в калмановском фильтре наземных радиолокационных станций (РЛС), вычислителем весовых коэффициентов диспетчерского пункта, в котором проводится определение весовых коэффициентов на каждом шаге с учетом значений невязки дальности, полученных от вычислителей каждой из РЛС.

Введение

Повышение безопасности маневрирования воздушных судов (ВС) – важная задача информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), выполняющих задачи диспетчерского сопровождения маневрирующих ВС в районе аэродрома. Согласно плану развития гражданской авиации на 2013 – 2028 гг. [1], утвержденному Международной организацией гражданской авиации (ICAO), а также п. 4.5.2.4.2. Федеральных авиационных правил т. 2 ч. 170 [2], ИИУС, выполняющая задачи диспетчерского сопровождения маневрирующих ВС, должна поддерживать третичную обработку радиолокационной информации. Решение задачи повышения точностных характеристик измерения координат движения ВС системой способствует повышению пропускной способности ИИУС при сохранении заданного уровня безопасности.

Обработка информации, поступающей от нескольких источников радиолокационной информации, принято называть третичной обработкой информации [3]. Главная задача третичной обработки информации в ИИУС – повышение точности оценки координат движения ВС за счет использования данных от нескольких РЛС. Третичная обработка информации проводится в диспетчерском пункте системы на основании результатов вторичной обработки информации

о координатах ВС от каждой из используемых РЛС системы. Основными этапами третичной обработки информации являются сбор полученной от РЛС информации о движении ВС, приведение к единой системе координат и единому времени, оценка радиолокационной информации (**РЛИ**) о движении ВС, полученной от РЛС, укрупнение оцененной информации [3 – 5]. Наиболее важным этапом третичной обработки информации является оценка информации о движении ВС.

Оценка координат движения ВС, полученная от нескольких РЛС и приведенная к единой системе координат, проводится одним из методов: математического усреднения или весовой обработки информации.

Информационно-измерительная и управляющая система с применением третичной обработки информации

Рассмотрим ИИУС с дальномерным каналом, где используется третичная обработка информации.

В зависимости от метода оценки дальности ВС относительно наземных РЛС при третичной обработке информации, структура ИИУС будет отличаться, однако можно выделить общие основные составляющие части: наземные РЛС1, РЛС2 и диспетчерский пункт (рис. 1, а).

Наземные РЛС идентичны. Каждая РЛС состоит из приемо-передающей аппаратуры (**ППА**), аналого-цифрового преобразователя (**АЦП**) дальности, датчика измерения дальности (**ДИ**), калмановского фильтра оценки дальности (**ФОД**) и аппаратуры передачи информации РЛС (**АПРЛС**). Приемо-передающая аппаратура формирует зондирующий сигнал, который излучается в пространство в сторону ВС. Отраженный сигнал (**ОС**) от ВС поступает на вход приемо-передающей аппаратуры, где происходит его обнаружение. Отраженный сигнал и синхронизирующий импульс (**СИ**) с выхода приемо-передающей аппаратуры поступают на АЦП дальности для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Затем цифровые сигналы ОС и СИ поступают на датчик измерения дальности, который регистрирует значение дальности до ВС методом измерения задержки по времени ОС относительно СИ. С выхода датчика измерения дальности, полученное значение поступает на калмановский фильтр оценки дальности, где осуществляется ее вторичная обработка. Оцененное значение дальности поступает в аппаратуру передачи информации РЛС, а затем в приемную аппаратуру диспетчерского пункта (**ПАДП**).

Диспетчерский пункт ИИУС состоит из диспетчера (**ДП**), приемной аппаратуры, устройства синхронизации координат и времени (**УС**), фильтра усреднения дальности (**ФУД**), фильтра укрупнения отметок (дальности) (**ФУО**), аппаратуры отображения информации (**АОИ**) диспетчера, аппаратуры управления ИИУС (**АУ ИИУС**), аппаратуры связи диспетчера (**АСД**). Информация о дальности до ВС с приемной аппаратуры диспетчерского пункта поступает в устройство синхронизации координат и времени, в котором информация от РЛС1 и РЛС2 приводится к единой системе координат и времени. В фильтре усреднения дальности проводится третичная оценка дальности до ВС с учетом радиолокационной информации от двух РЛС. Третичная оценка дальности через фильтр укрупнения дальности поступает на аппаратуру отображения информации диспетчера, где отображается информация дальности до ВС. Диспетчер использует информацию дальности до ВС, который при необходимости дает команду об укрупнении РЛИ, либо, при потенциальной вероятности возникновения конфликтных ситуаций ВС при маневрировании, передает команду с помощью аппаратуры связи об изменении пространственного положения ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях на величины ΔX , ΔY , ΔZ .

Одним из наиболее простых методов оценки информации о фазовых координатах ВС является метод математического усреднения. Метод математического усреднения заключается в нахождении среднего арифметического от значений фазовых координат движения ВС от каждой из РЛС в данный момент времени [4, 6]. При определении координат движения ВС (дальности, азимута, угла места) в РЛС информация поступает в диспетчерский пункт, где оценка проводится согласно формуле

$$X_i = \frac{X1_i + X2_i}{2}, \quad (1)$$

здесь X_i – значение фазовой координаты движения ВС, полученное в результате третичной обработки информации в момент времени i ; $X1_i$, $X2_i$ – значения фазовых координат движения ВС, полученные в результате вторичной обработки информации в РЛС1 и РЛС2 соответственно в момент времени i .

Рассмотрим структуру ИИУС с применением метода математического усреднения при оценке дальности до ВС (см. рис. 1, а).

Главное достоинство данного метода – простота реализации в ИИУС, поскольку вычислительные затраты минимальные, однако точность оценки фазовых координат движения ВС при использовании данного метода не способна обеспечить безопасное движение ВС [4 – 6]. Это объясняется тем, что при использовании метода математического усреднения не учитываются точностные характеристики РЛС, входящих в состав ИИУС, а также параметры маневрирования ВС.

Более точным, но сложным в реализации, является метод весовой обработки информации, где оценка при третичной обработке информации проводится согласно выражению [3]

$$X_i = b1_i X1_i + b2_i X2_i, \quad (2)$$

где $b1_i$, $b2_i$ – значения весового коэффициента фазовой координаты движения ВС для информации, поступающей от РЛС1 и РЛС2 соответственно.

Метод математического усреднения координат ВС можно также считать методом весовой обработки. В таком случае радиолокационная информация, поступающая от двух РЛС, считается равной по весу, то есть $b1 = b2 = 0,5$ [3, 6, 9].

Весовые коэффициенты, используемые в существующих методах весовой обработки, являются априорными, то есть не изменяются в процессе маневрирования ВС [6, 9].

Так, при использовании метода весовой обработки, представленного в [3, 9], используются априорные данные о среднеквадратической погрешности оценки фазовых координат маневрирования ВС в РЛС согласно формуле

$$X_i = \frac{\frac{1}{\sigma1^2} X1_i + \frac{1}{\sigma2^2} X2_i}{\frac{1}{\sigma1^2} + \frac{1}{\sigma2^2}}, \quad (3)$$

где $\sigma1$, $\sigma2$ – априорные значения среднеквадратических погрешностей (СКП) фазовых координат маневрирования ВС, не изменяющиеся в процессе маневрирования ВС.

Структура ИИУС с применением методов априорной весовой обработки при оценке дальности до ВС представлена на рис. 2.

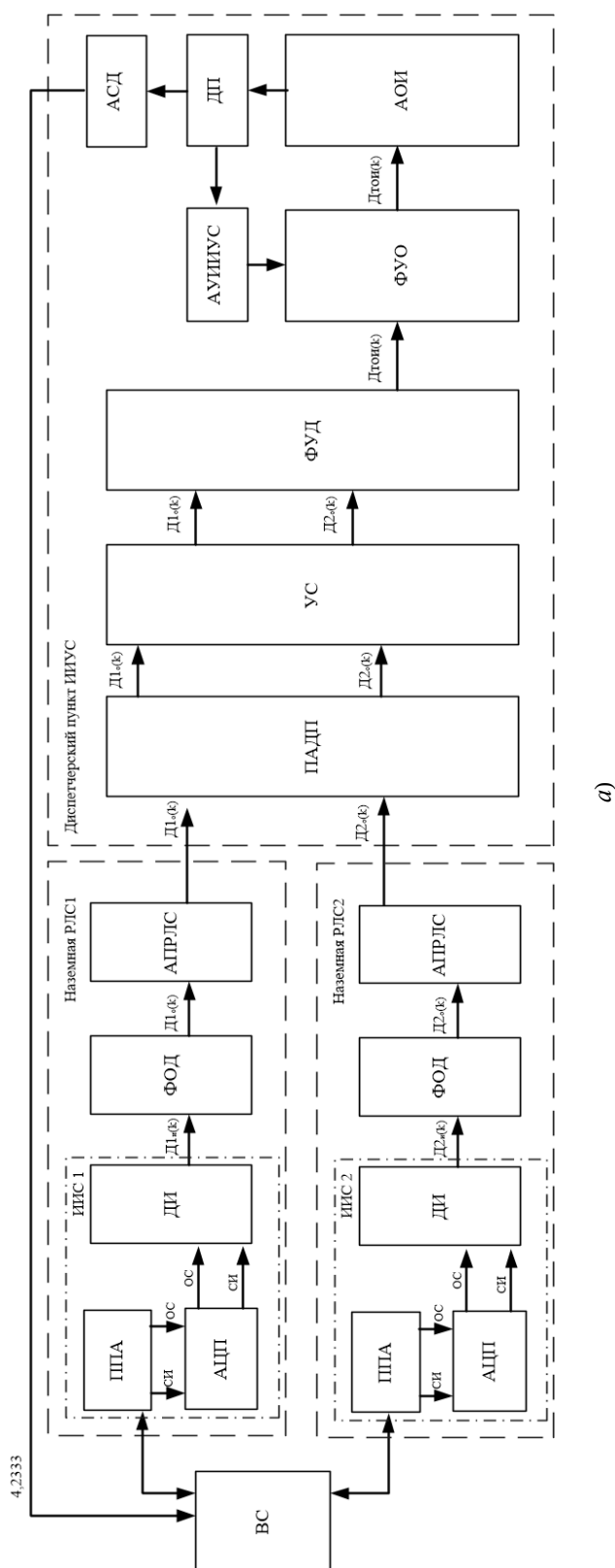


Рис. 1. Структура ИИУС с применением третичной обработки информации методом математического усреднения дальности до ВС (а) (начало)

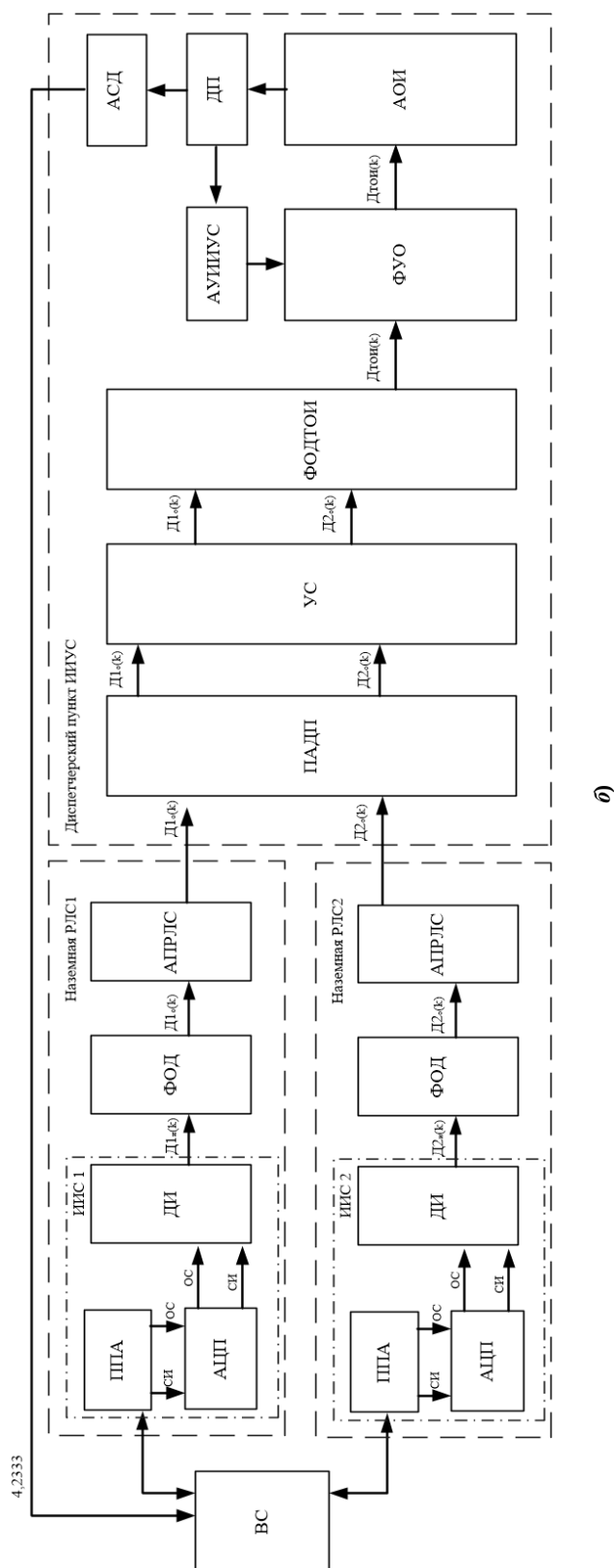


Рис. 1. методом весовой обработки информации о дальности до ВС (б) (продолжение)

Отличием структуры, представленной на рисунке 1, б, от структуры ИИУС с методом математического усреднения (см. рис. 1, а) является наличие фильтра оценки дальности третичной обработки информации (**ФОДТОИ**), где, учитывая априорные точностные характеристики РЛС системы, проводится оценка дальности согласно выражению (3).

Применение в ИИУС метода весовой обработки при оценке дальности до ВС способствует повышению точностных характеристик системы в сравнение с применением метода математического усреднения. Однако, поскольку весовые коэффициенты являются априорными, не учитываются апостериорные параметры маневрирования ВС и пространственное расположение РЛС [10, 11].

Решением данной проблемы является использование при оценке фазовых координат маневрирования ВС апостериорных параметров движения ВС. Так, в методе весовой обработки с апостериорными весовыми коэффициентами, представленном в [9, 10], таким параметром является невязка дальности до ВС. Оценка дальности до ВС при третичной обработке информации методом весовой обработки, описанным в [9, 10], проводится согласно выражению [12]

$$D_{\text{ТОИ}}(k) = b_1(k)D_{\text{о1}}(k) + b_2(k)D_{\text{о2}}(k); \quad (4)$$

$$b_1(k) = \frac{Q1(k)}{Q1(k) + Q2(k)}; \quad (5)$$

$$b_2(k) = \frac{Q2(k)}{Q1(k) + Q2(k)}; \quad (6)$$

$$Q1(k) = (2\pi D_1)^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta D_1(k))^2}{2D_1} \right\} (1 - b_1(k-1)); \quad (7)$$

$$Q2(k) = (2\pi D_2)^{-0.5} \exp \left\{ -\frac{(\Delta D_2(k))^2}{2D_2} \right\} (1 - b_2(k-1)), \quad (8)$$

где D_1, D_2 – дисперсии невязки по дальности для наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно; $\Delta D_1(k), \Delta D_2(k)$ – значения невязок дальности для наземных РЛС1 и РЛС2 соответственно; $D_{\text{о1}}(k), D_{\text{о2}}(k)$ – оцененные значения дальности до ВС.

Структура ИИУС с применением метода апостериорной весовой обработки с применением невязки дальности при оценке дальности до маневрирующего ВС представлена на рис. 1, в.

Главным отличием предложенной структуры ИИУС с применением апостериорной весовой третичной обработки информации является использование измерителей невязки дальности (**ИНД**) в РЛС1 и РЛС2, где проводятся вычисления невязки дальности на каждом шаге измерения, а также фильтра оценки весовых коэффициентов (**ВВК**) в диспетчерском пункте, учитывающего информацию о невязке дальности, определяемую в процессе вторичной обработки информации в измерителях невязки дальности каждой из РЛС.

Информация о невязке дальности от РЛС поступает в аппаратуру приема диспетчерского пункта, откуда поступает в фильтр оценки весовых коэффициентов, где проводится оценка весовых коэффициентов в реальном времени, влияющая в дальнейшем на оценку дальности при третичной обработке информации [12, 13].

Заключение

Использование разработанной ИИУС с применением третичной обработки информации методом весовой апостериорной обработки, учитывающим невязки дальности, способствует улучшению точностные характеристик оценки дальности до 60 % по сравнению с ИИУС, использующими другие методы третичной обработки информации, а также позволяет повысить пропускную способности ИИУС при сохранении заданного уровня безопасности до 15 % [12, 14].

Список литературы

1. Глобальный аэронавигационный план на 2013 – 2028 гг. Междунар. организация гражданской авиации. – Монреаль, 2013. – 147 с.
2. О введении в действие Авиационных правил. Часть 170 «Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс. Том II. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс» : Приказ Министерства транспорта РФ № 12 от 25.01.2016 г. – URL: <https://base.garant.ru/71330626/> (дата обращения: 20.04.2024).
3. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учеб. пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 84 с.
4. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М. : Радио и связь, 1986. – 352 с.
5. Белоцерковский, Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства : учеб. пособие / Г. Б. Белоцерковский – М. : Советское радио, 1975. – 336 с.
6. Ботов, М. И. Основы теории радиолокационных систем и комплексов : учеб. пособие / М. И. Ботов, В. А. Вяхирев – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 530 с.
7. Дементьев, Р. О. Обеспечение помехоустойчивости измерительного канала интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля / Р. О. Дементьев, З. М. Селиванова // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2016 : материалы XXIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов, 07 – 09 декабря 2016 г., Рязань. – Рязань, 2016. – С. 110 – 113.
8. Применение калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в третичной обработке информации / А. И. Рогачев, А. И. Сустин, Ю. Н. Панасюк [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 47 – 52. doi : 10.17277/vestnik.2019.01.pp.047-052.
9. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
10. Сустин, А. И. Третичная обработка радиолокационной информации в дальномерном канале [Текст] / А. И. Сустин, А. И. Рогачёв // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. – Тамбов, 2018. – С. 66 – 68.
11. Algorithm Synthesis for Tertiary Information Processing of Distance Measuring Channel in Information and Measurement System of Air Traffic Control / Pudovkin A. P., Panaszuk Yu. N., Sustin A. I., Danilov S. N., Valepo L. G., Trapeznikova O. V. // Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference "Mechanical Science and Technology Update", MSTU, 2020.
12. Пат. № 2780803 С1 Российская Федерация, МПК G01S 13/70, G01S 13/87. Способ оценки дальности до маневрирующего воздушного судна информационно-измерительной системой управления воздушным движением с применением третичной обработки информации / А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, А. И. Сустин ;

заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». – № 2021132513 : заявл. 09.11.2021 ; опубл. 04.10.2022, Бюл. № 28. – 12 с.

13. Сустин, А. И. Перспективы развития информационно-измерительной системы для управления воздушным движением с третичной обработкой информации / А. И. Сустин, А. П. Пудовкин // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. VIII Всерос. молодеж. науч. конф., 10 мая 2023 г., Тамбов. – Тамбов, 2023. – С. 133 – 135.

14. Сустин, А. И. Информационно-измерительная система с применением третичной обработки информации для повышения точности оценки дальности воздушных судов / А. И. Сустин, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием для студентов, молодых ученых и специалистов, 19 октября 2022 г., Тамбов. – Тамбов : Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – С. 23 – 25.

The Information-Measuring and Control System with a Rangefinder Channel for Tertiary Processing of Radar Information of Increased Accuracy

A. I. Sustin✉, A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk

Department of Radio Engineering,
resbn@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: information-measuring and control system; range estimation; rangefinder channel; tertiary information processing; weight processing of information; range discrepancy.

Abstract: To increase the accuracy characteristics of information measuring and control systems (IMCS) using tertiary information processing, performing the tasks of dispatching support of maneuvering aircraft in the airfield area, as well as to increase the system capacity while maintaining a given level of safety, the IMCS structure is proposed using the method of weighted tertiary information processing with a posteriori weight coefficients that take into account changes in the range discrepancy to the aircraft at each step. The proposed structure is distinguished by the presence of range discrepancy meters in the Kalman filter of ground-based radar stations (radars), a calculator for the weighting coefficients of the control room, in which the weighting coefficients are determined at each step, taking into account the range discrepancy values obtained from the calculators of each of the radars.

References

1. *Global'nyj aeronavigacionnyj plan na 2013-2028 gg. Mezhdunar. organizaciya grazhdanskoj aviacii* [Global Air Navigation Plan for 2013-2028. International Civil Aviation Organization]. Montreal, 2013, 147 p. (In Russ.)
2. [On the introduction of Aviation Regulations. Part 170 "Certification of aerodromes and airways equipment. Volume II. Certification requirements for the equipment of airfields and airways"]. *Prikaz Ministerstva transporta RF*. no. 12 dated 01/25/2016. [Access from the ConsultantPlus legal reference system]. (In Russ.)

3. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Obrabotka radiolokacionnoj informacii v radiotekhnicheskikh sistemah* [Processing of radar information in radio engineering systems]: Textbook. Tambov: Publishing house of FGBOU VO "TSTU", 2016. 84 p. (In Russ.)
4. Kuzmin S. Z. *Osnovy proektirovaniya sistem cifrovoy obrabotki radiolokacionnoj informacii* [Fundamentals of designing systems for digital processing of radar information]. Moscow: Radio and Communications, 1986. 352 p. (In Russ.)
5. Belotserkovsky G.B. *Osnovy radiolokacii i radiolokacionnye ustrojstva* [Fundamentals of radar and radar devices]: Textbook. Moscow: Soviet radio, 1975. 336 p. (In Russ.)
6. Botov M.I., Vyakhirev V.A. *Osnovy teorii radiolokacionnykh sistem i kompleksov* [Fundamentals of the theory of radar systems and complexes]: Textbook. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Univ., 2013. 530 p. (In Russ.)
7. Dementiev R.O., Selivanova Z.M. *Obespechenie pomekhoustoichivosti izmeritel'nogo kanala intellektual'noj informacionno-izmeritel'noj sistemy distancionnogo kontrolya. Biotekhnicheskie, medicinskie i ekologicheskie sistemy i komplekсы. Biomedistemy-2016: materialy XXIX Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchenykh i specialistov* [Biotechnical, medical and ecological systems and complexes. Biomedical systems-2016]: conference proceedings, Ryazan, December 07-09, 2016. Ryazan State Radio Engineering University. Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University, 2016, pp. 110-113. (In Russ.)
8. Rogachev A.I., Sustin A. I., Panasyuk Yu. N. [et al.] [Application of Kalman filtration for the method of dynamic weighting coefficients in tertiary information processing], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 47-52. doi : 10.17277/vestnik.2019.01.pp.047-052. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnye metody obrabotki informacii v radiotekhnicheskikh sistemah* [Promising methods of information processing in radio engineering systems]: monograph. St. Petersburg: Expert Solutions, 2014. 256 p. (In Russ.)
10. Sustin A.I., Rogachev A.I. [Tertiary processing of radar information in a rangefinder channel], *sb. nauch. tr.* [Collection of scientific tr. Radioelectronics. Problems and prospects of development], Tambov, 2018, pp. 66-68. (In Russ.)
11. Pudovkin A.P., Panaszuk Yu.N., Sustin A.I., Danilov S.N., Valepo L.G., Trapeznikova O.V. *Algorithm synthesis for tertial information processing of distance measuring air traffic control in information and measurement system of air traffic control. Journal of Physics: Conference Series: IV International Scientific and Technical Conference "Mechanical Science and Technology Update", MSTU, 2020.* (In Russ.)
12. Pudovkin A.P., Panasyuk Yu.N., Sustin A.I. *Sposob ocenki dal'nosti do manevriruyushchego vozdušnogo sudna informacionno-izmeritel'noj sistemoj upravleniya vozdušnym dvizheniem s primeneniem tretichnoj obrabotki informacii* [A method for estimating the range to a maneuvering aircraft by an information and measuring air traffic control system using tertiary information processing]. Russian Federation, Pat. 2780803 C1 IPC G01S 13/70, G01S 13/87. (In Russ.)
13. Sustin A.I., Pudovkin A.P. *Perspektivy razvitiya informacionno-izmeritel'noj sistemy dlya upravleniya vozdušnym dvizheniem s tretichnoj obrabotkoj informacii. Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: Sb. tr. VIII Vseros. molodezh. nauch. konf.* [Radioelectronics. Problems and prospects of development: Proceedings of the Eighth All-Russian Youth Scientific Conference], Tambov, May 10, 2023. Tambov: Tambov State Technical University, 2023, pp. 133-135. (In Russ.)
14. Sustin, A. I. *Informacionno-izmeritel'naya sistema s primeneniem tretichnoj obrabotki informacii dlya povysheniya tochnosti ocenki dal'nosti vozdušnykh sudov. Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemah: Materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem dlya studentov, molodykh uchenykh*

i specialistov [Energy saving and efficiency in technical systems: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation for students, young scientists and specialists], Tambov, October 19, 2022. Tambov: Publishing Center of the Tambov State Technical University, 2022, pp. 23-25. (In Russ.)

Informationsmessendes und –steuerndes System mit Entfernungskanal der tertiären Radardatenverarbeitung der Information der erhöhten Genauigkeit

Zusammenfassung: Zur Verbesserung der Genauigkeitseigenschaften von Informationsmess- und -steuerungssystemen (IMSS) mit tertiärer Informationsverarbeitung, die die Aufgaben der Abfertigungsunterstützung von manövrierenden Flugzeugen im Flugplatzbereich wahrnehmen, sowie zur Erhöhung der Durchsatzkapazität des Systems unter Beibehaltung eines bestimmten Sicherheitsniveaus ist die Struktur von IMSS mit der Methode der gewichteten tertiären Informationsverarbeitung mit nachträglichen Gewichtskoeffizienten vorgeschlagen, die die Änderungen der Entfernungsdiskrepanz zu den Flugzeugen bei jedem Schritt berücksichtigt. Die vorgeschlagene Struktur ist gekennzeichnet durch das Vorhandensein von Entfernungsdiskrepanzmessern im Kalman-Filter der Bodenradarstationen (Radare), einen Gewichtskoeffizientenrechner in der Leitstelle, der die Gewichtskoeffizienten bei jedem Schritt unter Berücksichtigung der Entfernungsdiskrepanzwerte, die von den Rechnern jeder Radarstation erhalten werden, bestimmt.

Système d'information, de mesure et de commande avec le canal de mesure à distance de traitement tertiaire des informations de localisation radio de précision accrue

Résumé: Pour améliorer les caractéristiques de précision des systèmes d'information, de mesure et de contrôle (SIMC) avec l'utilisation d'informations tertiaires, effectuant des tâches de contrôle des aéronefs de manœuvre (AM) dans la zone de l'aérodrome, ainsi que pour augmenter la capacité du système tout en maintenant un niveau de sécurité prédéterminé, est proposée une structure SIMC utilisant une méthode de traitement de l'information et tenant compte des changements. La structure proposée se distingue par la présence de compteurs d'écart de distance dans le filtre Kalman des stations radar au sol (radar), calcul des coefficients de pondération de la salle de contrôle, qui détermine les coefficients de pondération à chaque étape en tenant compte des valeurs d'écart de distance obtenues à partir des calculateurs de chacun des radars.

Авторы: *Сустин Александр Иванович* – ассистент кафедры «Радиотехника»; *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника»; *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСТРОЙСТВЕ БАРАБАННОГО ТИПА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

П. М. Смирнов¹, С. Н. Черпицкий¹,
М. Ю. Таршис^{1✉}, Л. В. Королев², А. Б. Капранова¹

*Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика» (1),
«Информационные системы и технологии» (2),
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
mutarshis@yahoo.com; Россия, Ярославль*

Ключевые слова: коэффициент неоднородности; методика; процесс смешивания; сыпучие материалы; экспериментальные исследования.

Аннотация: Разработана методика проведения экспериментальных исследований процесса смешивания сыпучих материалов в аппарате непрерывного действия с дополнительными рабочими элементами. В соответствии с данной методикой проведены исследования влияния конструктивных параметров на качество получаемой смеси. Получены кривые смешивания, которые могут быть использованы при проектировании новых аппаратов. Проведено сравнение экспериментальных зависимостей с результатами численного моделирования.

Введение

Смесители гравитационно-пересыпного действия используются в различных отраслях производства. Наибольшее применение они находят в отраслях химической промышленности, строительного производства, металлургии и др. Преимущественно это смесители барабанного типа. Их распространенность связана с простотой конструкции, низкой энергоемкостью, однако они зачастую отличаются малой эффективностью при переработке компонентов, склонных к сегрегации, которая проявляется в том, что более плотные и мелкие частицы локализуются в центре циркуляции смеси. Отчасти данную проблему решает применение дополнительных элементов, проходящих при вращении корпуса смесителя через центр сегрегации смеси и подавляющих ее. При этом именно непрерывно действующие смесители предпочтительны для использования в производственных линиях и задача их создания является актуальной. Решение задачи повышения эффективности смесителей в первую очередь связано с проведением корректных (и адекватных) исследований реализуемого процесса. Такие исследования включают экспериментальные, устанавливающие влияние основных параметров системы «смеситель – компоненты» на качество получаемых смесей, и теоретические – основанные на численном моделировании процесса.

Описание установки и методика проведения эксперимента

Рассмотрим методику проведения эксперимента и приведем результаты исследований конструктивных параметров нового смесителя, эффективность которого достигается применением в конструкции разнонаправленных эластичных лопастей [1]. Смеситель содержит корпус, состоящий из торообразных эластичных камер, расположенных в горизонтальной трубе. Борта камер надрезаны, и элементы бортов отогнуты поочередно в противоположных направлениях с образованием лопастей, которые связаны с механизмом регулировки углов их наклона. Камеры сообщаются с патрубками загрузки компонентов и выгрузки смеси.

Цель исследований – установить влияние параметров смесителя, процесса и свойств сыпучих компонентов на критерий качества получаемых составов. Входные параметры системы «смеситель – материалы» и диапазоны их варьирования выбирались следующим образом.

Конструктивные: $L = [0,01...0,4]$ м – длина рабочей камеры; $D = 0,23$ м – внутренний диаметр рабочей камеры; $l_p = 0,03$ м, $h_p = 0,02$ м – длина и высота лопасти соответственно; $\varphi_p = 90^\circ$ – угловое расстояние между соседними лопастями в поперечном сечении рабочей камеры; $L_p = 0,06$ м – расстояние от края лопасти до перегородки (точки выгрузки смеси); $\alpha = [45...90]^\circ$ – угол наклона (отгиба) лопастей к плоскости поперечного сечения рабочей камеры.

Режимные: $K_3 = 0,3$ – коэффициент загрузки; $\nu = 60$ об/мин – частота вращения корпуса; $c_0 = 0,3$ – концентрация ключевого компонента в смеси.

Физико-механические свойства смешиваемых материалов: $d = 0,03; 0,05$ см – средний диаметр частиц ключевого и несущего компонентов соответственно; $\rho = 0,49; 0,66$ г/см³ – насыпная плотность ключевого и несущего компонентов соответственно.

Экспериментальная установка содержит внутри корпуса ступени с лопастями, прозрачные кольцевые перегородки и торцевые стенки. После загрузки компонентов в непрерывно действующий смеситель, стабилизации его работы и включения проводится исследование смеси в аппарате. Для этого передняя торцевая стенка и кольцевые перегородки последовательно снимаются. После удаления сыпучего материала, находящегося перед очередной перегородкой, проводится анализ смеси в сечении, непосредственно примыкающем к противоположной стороне перегородки, по бесконтактному способу [2, 3]. Бесконтактный способ определения качества смеси [3] разработан в целях повышения эффективности исследований. Он предполагает фиксацию изображения поверхности смеси через прозрачную стенку, анализ изображения посредством деления его на пробные зоны и вычисление в них концентраций ключевого компонента с последующим вычислением критерия качества смеси. В качестве такого критерия в данной работе принят коэффициент неоднородности

$$V_C = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (1)$$

где $\bar{c}$ – средняя по сечению смеси концентрация ключевого компонента; c_i – концентрация ключевого компонента в i -й пробной зоне; n – число пробных зон.

Полученные значения коэффициента неоднородности для каждого сечения усреднялись по результатам семи экспериментов. Для оценки сглаживающей способности смесителя использовалось среднеквадратическое отклонение средних концентраций в сечении смеси

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (\bar{c}_k - c_0)^2}, \quad (2)$$

где $\bar{c}_k$ – средняя концентрация ключевого компонента в сечении смеси, наблюдаемая в k -м эксперименте; m – число экспериментов.

Результаты экспериментов

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 и 2. Для выяснения функционального вида полученных зависимостей рассматривались различные варианты аппроксимирующих функций. Наиболее адекватной признана экспоненциальная аппроксимация [4]. Числовые коэффициенты аппроксимирующих функций определялись методом наименьших квадратов, при этом коэффициент детерминации R^2 во всех случаях был не ниже 0,95. Полученные формулы и соответствующие графики приведены на рисунках вместе с экспериментальными данными.

На рисунке 1 показаны графики, отражающие изменение качества смеси в зависимости от расстояния между исследуемым сечением и точкой загрузки компонентов, то есть фактически от длины корпуса смесителя L . Из графиков видно, что для больших углов отгиба лопастей $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$ (кривые 1 и 2) сначала происходит существенный рост однородности смеси (коэффициент неоднородности падает) с увеличением L , а затем качество стабилизируется при $L > 0,15$. Если угол отгиба равен $\alpha = 45^\circ$ (кривая 3), то коэффициент неоднородности продолжает снижаться и при $L > 0,15$. Такое влияние угла отгиба лопастей на качество смеси можно объяснить следующим образом. При больших углах лопасти преимущественно поднимают материал вверх, способствуя только его дополнительной циркуляции в горизонтальном сечении. При меньших углах отгиба лопасти начинают не только поднимать материал, но и перемещать его вдоль оси барабана как в прямом направлении (от точки загрузки), так и обратном, что при той же длине устройства существенно увеличивает время пребывания смеси в устройстве, тем самым повышая ее качество. Интенсивная осевая циркуляция материала приводит и к увеличению сглаживающей способности смесителя (рис. 2). При $\alpha = 45^\circ$ величина σ существенно меньше, чем при $\alpha = 90^\circ$.

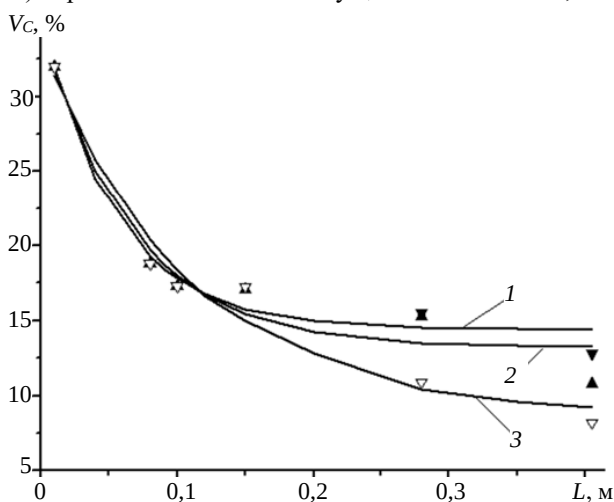


Рис. 1. Зависимость коэффициента неоднородности смеси от расстояния до точки загрузки при различных углах наклона лопастей α :
 1 – $\alpha = 90^\circ$, $V_C = 21,0 \exp(-L/0,05) + 14,4$; 2 – $\alpha = 60^\circ$, $V_C = 21,6 \exp(-L/0,07) + 13,2$;
 3 – $\alpha = 45^\circ$, $V_C = 25,0 \exp(-L/0,11) + 8,7$
 (значки – экспериментальные точки, линии – аппроксимирующие функции)

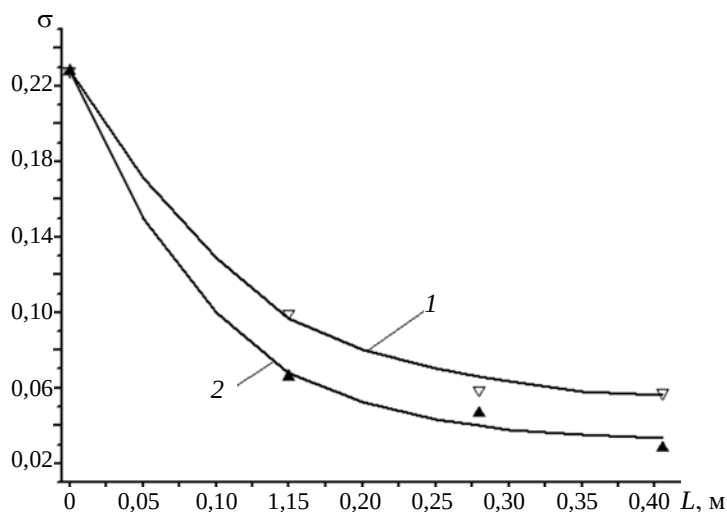


Рис. 2. Зависимость сглаживающей способности смесителя от расстояния до точки загрузки при различных углах наклона лопастей α :
 1 – $\alpha = 90^\circ$, $\sigma = 0,18\exp(-L/0,11) + 0,05$; 2 – $\alpha = 45^\circ$, $\sigma = 0,19\exp(-L/0,09) + 0,03$
 (значки – экспериментальные точки, линии – аппроксимирующие функции):

Результаты численного моделирования.

Численное моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в рассматриваемом устройстве проводилось на основе метода дискретных элементов, предложенного в работе [5]. Масса сыпучего материала была представлена в виде совокупности вязко-пластичных модельных частиц. Размер частиц выбирался малым по сравнению с размерами элементов установки, но при этом достаточно большим по сравнению со средним размером частиц сыпучего материала. Таким образом, положение и скорость каждой модельной частицы можно рассматривать как положение и скорость центра масс некоторого представительного объема, содержащего большое число реальных частиц ключевого или несущего компонента смеси. Предложенный метод позволяет вычислить координаты модельных частиц (x_i , y_i , z_i) на каждом этапе процесса смешивания. По этим координатам можно определить объемную концентрацию ключевого компонента c в произвольной точке с координатами (x , y , z) внутри смесителя, применяя процедуру сглаживания распределения модельных частиц с гауссовым ядром:

$$c(x, y, z) = \frac{\sum_{i \in K} \exp\left(-\left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2\right)/\Delta^2\right)}{\sum_{i \in P} \exp\left(-\left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2\right)/\Delta^2\right)}, \quad (3)$$

где Δ – масштаб сглаживания, равный размеру пробных зон, на которые делилось изображение смеси при экспериментальном определении коэффициента неоднородности.

Суммирование в числителе правой части уравнения (3) ведется по множеству номеров K модельных частиц, представляющих ключевой компонент, а суммирование в знаменателе – по множеству номеров P всех модельных частиц. Полагая в (3) координату z равной расстоянию L от точки загрузки, на котором проводилось исследование смеси, можно получить поле объемной концентрации ключевого

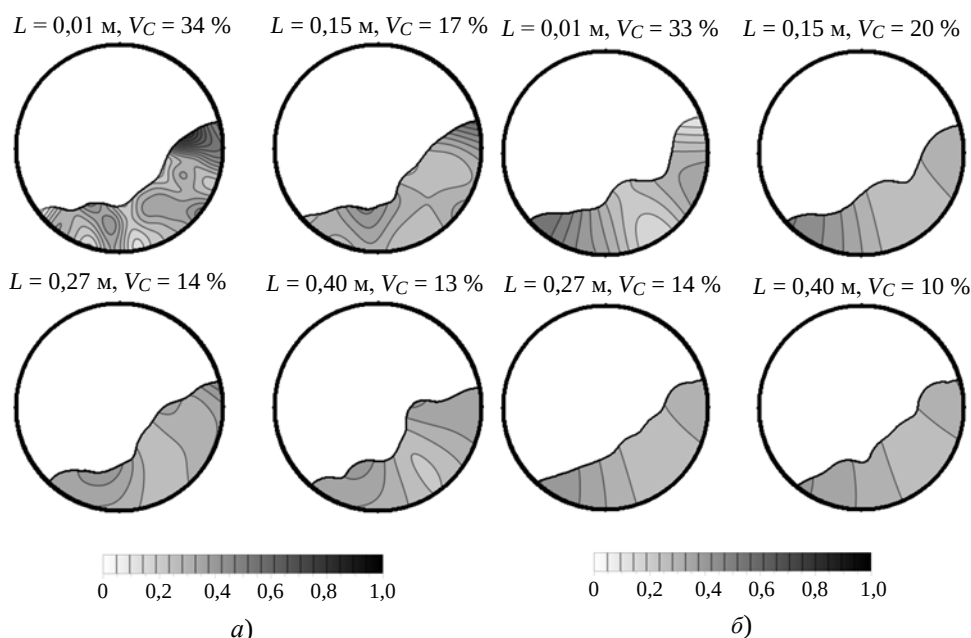


Рис. 3. Поля концентрации ключевого компонента в различных сечениях смеси при $\alpha = 90^\circ$ (а) и $\alpha = 45^\circ$ (б)

компонента в соответствующем сечении. На рисунках 3, а, б представлены контурные графики рассматриваемых полей для углов отгиба лопастей $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$. Картина распределения ключевого компонента смеси по сечению на рисунках качественно соответствует наблюдавшейся в экспериментах, также на рисунках указаны вычисленные по представленным полям концентрации значения коэффициента неоднородности V_C . Приведенные значения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (см. рис. 1).

Заключение

Полученные в работе зависимости качества сыпучей смеси от длины рабочей камеры смесителя при различных углах наклона перемешивающих лопастей могут быть использованы для определения оптимальных параметров конструкции и проектирования аппаратов барабанно-лопастного типа. Качественное и количественное соответствие результатов численного моделирования процесса смешивания по методу, представленному в работе [5], с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о возможности применения численного эксперимента для предварительной оценки эффективности аппаратов рассматриваемого типа.

Список литературы

1. Пат. 2626203 Российская Федерация, МПК B01F 9/02, B01F 3/18. Смеситель / М. Ю. Таршис, С. Н. Черпицкий, Л. В. Королев, А. И. Зайцев ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2016126747 ; заявл. 04.07.2016 ; опубл. : 24.07.2017, Бюл. № 21. – 6 с.
2. Таршис, М. Ю. Исследование качества сыпучей смеси. Моделирование. Критерии. Эксперимент : монография / М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. И. Зайцев. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2015. – 116 с.

3. Пат. 2690539 Российская Федерация, МПК B01F 3/18, G01N 21/00. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету / М. Ю. Таршис, С. Н. Черпицкий, Л. В. Королев, А. Б. Капранова ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2018124251 ; заявл. 02.07.2018 ; опубл. : 04.06.2019, Бюл. № 16. – 9 с.

4. Смирнов, П. М. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в аппаратах с дополнительными рабочими элементами / П. М. Смирнов, С. Н. Черпицкий, М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 6. – С. 36 – 39. doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_6_36

5. Черпицкий, С. Н. Математическое моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе / С. Н. Черпицкий, Л. В. Королев, М. Ю. Таршис // Известия вузов. Химия и химические технологии. – 2022. – Т. 65, № 9. С. 112 – 120. doi: 10.6060/ivkkt.20226509.6504

Investigation of the Bulk Materials Mixing Process in a Drum-Type Device with Additional Working Elements

P. M. Smirnov¹, S. N. Cherpitskiy¹, M. Yu. Tarshis^{1✉}, L. V. Korolev², A. B. Kapranova¹

*Departments of Theoretical and Applied Mechanics (1),
Information Systems and Technologies (2), mutarshis@yahoo.com;
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: bulk materials; mixing process; methodology; experimental studies; coefficient of heterogeneity.

Abstract: A methodology for conducting experimental studies of the bulk materials mixing process in a continuous-acting apparatus with additional working elements has been developed. In accordance with this methodology, studies of the influence of design parameters on the quality of the resulting mixture were carried out. The obtained mixing curves can be used in the design of new devices. The experimental dependences are compared with the results of numerical simulation.

References

1. Tarshis M.Yu., Cherpitsky S.N., Korolev L.V., Zaitsev A.I. *Smesitel* [Mixer], Russian Federation, 2017, Pat. 2626203. (In Russ.).

2. Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaitsev A.I. *Issledovaniye kachestva sypuhey smesi. Modelirovaniye. Kriterii. Eksperiment: monografiya* [Investigation of the quality of loose mixes. Modeling. Criteria. Experiment: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2015, 116 p. (In Russ.)

3. Tarshis M.Yu., Cherpitsky S.N., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Sposob issledovaniya kachestva smesi komponentov, razlichayushchihsya po tsvetu* [Method of analyzing the quality of a mixture of components differing in colour], Russian Federation, 2019, Pat. 2690539. (In Russ.).

4. Smirnov P.M., Cherpitsky S.N., Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Kapranova A.B. [Investigation of the bulk materials mixing process in devices with additional working elements], *Matematicheskie metody v technologiyah i tehnikе* [Mathematical Methods in Technology and Engineering], 2023, no 6, pp. 36-39, doi 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_6_36 (In Russ., abstract in Eng.).

5. Cherpitskiy S.N., Korolev L.V., Tarshis M.Yu. [Mathematical modeling of the bulk materials mixing process in a drumblade mixer], *Izvtscitya Vysshih Uchebneh Zavedrnii. Khimiya i Khimicheskie Tekhnologii* [Chem. Chem. Tech.], 2022, vol. 65, no 9, pp. 112-120, doi: 10.6060/ivkkt.20226509.6504 (In Russ., abstract in Eng.).

Untersuchung des Verfahrens zum Mischen von Schüttgütern in einer Trommleinrichtung mit zusätzlichen Arbeitselementen

Zusammenfassung: Es ist eine Technik zur experimentellen Untersuchung des Mischprozesses von Schüttgütern in einem kontinuierlichen Apparat mit zusätzlichen Arbeitselementen entwickelt. Mit Hilfe dieser Methode ist der Einfluss der Konstruktionsparameter auf die Qualität der erhaltenen Mischung untersucht. Es sind Mischkurven ermittelt, die bei der Konstruktion neuer Apparate verwendet werden können. Die experimentellen Abhängigkeiten sind mit den Ergebnissen der numerischen Modellierung verglichen.

Étude du processus de mélange de matériaux en vrac dans un dispositif de type tambour avec des éléments de travail supplémentaires

Résumé: Est élaborée une méthodologie pour mener des études expérimentales sur le processus de mélange de matériaux en vrac dans un appareil à action continue avec des éléments de travail supplémentaires. Conformément à cette technique, sont effectuées des études sur l'influence des paramètres de conception sur la qualité du mélange obtenu. Des courbes de mélange peuvent être utilisées dans la conception de nouveaux appareils. Est faite une comparaison des dépendances expérimentales avec les résultats des simulations numériques.

Авторы: *Смирнов Павел Михайлович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Черницкий Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Таршиис Михаил Юльевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Королев Леонид Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии»; *Капанова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЕН

А. Н. Пахомов✉, Д. С. Пекшев, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
panpost@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: дисперсность пены; интенсивность пенообразования; механические устройства; сепарация пены; синтез пигментов и красителей; устойчивость пены.

Аннотация: Представлены результаты систематизации данных, полученных в результате экспериментальных исследований основных механических способов разрушения пен, формирующихся в процессе синтеза пигментов и красителей. Цель систематизации – получение критерия, позволяющего численно оценить и выбрать способ пеноразрушения с максимальными показателями по интенсивности отбора газовой фазы без проскока жидкой фазы, обоснованно осуществить подбор аппаратурного оформления для процесса пеноразрушения.

Введение

При синтезе большинства пигментов на отдельных стадиях в промышленных аппаратах наблюдается активное формирование пены. В зависимости от размера сепарационного пространства промышленных аппаратов объем выделяемой пены может достигать 10 м^3 и более [1]. Такая пена возникает в результате выделения парогазовой фазы и наличия в компонентах реагирующей смеси поверхностно-активных веществ (ПАВ). Формирующаяся промышленная пена может иметь различные параметры – от мелко- до крупнодисперсной, с высокой и низкой устойчивостью, различной интенсивностью формирования пены над поверхностью жидкой фазы [2].

Активное формирование пены на отдельных стадиях синтеза пигментов приводит, как правило, к ухудшению качества целевого продукта, проскоку полупродуктов во вспененном состоянии в смежные по технологической схеме аппараты, быстрому загрязнению аппарата, повышенным энергозатратам, уменьшению производительности аппарата вплоть до его останова. Поэтому в производстве с активным пенообразованием применяют различные методы разрушения пен: механические, тепловые, физические и их комбинации [2]. При этом открытой остается проблема выбора эффективного метода пеноразрушения для конкретной пены, так как метод, хорошо себя зарекомендовавший на одной стадии, может оказаться неэффективным для другой.

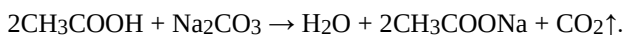
Экспериментальное исследование свойств промышленных пен и методов их разрушения часто сопряжено с рядом серьезных проблем, решение которых, в некоторых случаях, не представляется возможным [3, 4]. Это связано с тем, что, во-первых, зачастую на стадиях синтеза, сопровождающихся пенообразованием,

применяются редкие, дорогие компоненты, расход которых в лаборатории нецелесообразен, так как приведет к неприемлемой стоимости экспериментального исследования. Во-вторых, компоненты могут быть высокотоксичными и(или) сильно загрязняющими поверхности веществами. Соответственно работа с ними возможна только в определенных условиях на специализированном оборудовании, что также повысит стоимость исследования, либо не позволит исследовать некоторые перспективные методы воздействия на пену из-за ограничений применяемого в таких случаях специального оборудования.

Цель статьи – разработка методики формирования модельной пены с характеристиками (дисперсностью, интенсивностью выделения, устойчивостью), аналогичными исследуемым промышленным пенам. При этом необходимо, чтобы для формирования модельной пены применялись доступные, недорогие, неагрессивные компоненты, с которыми легко работать в условиях обычной химической лаборатории.

Формирование модельной пены

Для получения модельной пены с различными параметрами использовали воду с заданным количеством ПАВ и диоксид углерода, выделяющийся в результате реакции взаимодействия этановой (уксусной) кислоты и карбоната натрия



В цилиндр загружали рассчитанное количество реагентов (воду, карбонат натрия и ПАВ) и тщательно перемешивали. В полученную смесь добавляли уксусную кислоту, в результате чего происходило вспенивание. При необходимости реакционную массу дополнительно перемешивали. В зависимости от соотношения реагентов получалась пена с разной стойкостью, дисперсностью и интенсивностью пеновыделения.

Дисперсность модельной пены определяли с помощью измерительного микроскопа подсчетом числа пузырьков определенного размера [5, 6]. Интенсивность пеновыделения оценивали по времени увеличения объема пены в цилиндре. Устойчивость и кратности модельной пены определялась по методике, представленной в [7].

Как следует из результатов экспериментов по определению дисперсности модельной пены, уменьшение расхода ПАВ приводит к увеличению размеров пузырьков, форма пузырька стремится к многоугольнику; увеличение расхода ПАВ – к уменьшению размеров пузырьков, форма пузырьков стремится к шарообразной. Варьируя расход уксусной кислоты и используя дополнительное перемешивание, можно изменять интенсивность пенообразования.

В результате экспериментов по формированию модельной пены с различными характеристиками получены пены с размерами пузырьков от 0,5 до 3 мм различной формы, кратностью от 10 до 50, устойчивостью от 18 до 110 с. Пены с указанными параметрами позволяют моделировать поведение промышленных пен, формирующихся в процессах синтеза большинства пигментов и красителей.

Экспериментальная часть

Для анализа эффективности механических методов пеноразрушения предлагается ввести критерий эффективности пеноразрушения K , численные значения которого можно оценить по интенсивности пеноразрушения и объему разрушаемой пены (табл. 1).

Таблица 1

**Значения критерия эффективности пеноразрушения
по скорости и объему разрушаемой пены**

Эффективность пеноразрушения K	Поведение пены
0	Пена не разрушается
1	Пена разрушается незначительно (не более 10 % объема). Скорость разрушения пены мала (уменьшение объема происходит более чем за 15 с)
2	Пена значительно разрушается, но объем разрушаемой пены недостаточен (менее 50 %), возможно формирование вторичной мелкодисперсной пены
3	Пена значительно разрушается, но объем разрушаемой пены недостаточен (менее 80 %) и возможно формирование вторичной мелкодисперсной пены
4	Пена полностью разрушается, уменьшение объема происходит менее чем за 2...3 с, но возможно формирование вторичной мелкодисперсной пены
5	Пена быстро и полностью разрушается

Для оценки эффективности механических методов пеноразрушения использовалась установка, состоящая из мерного цилиндра диаметром $d_{ц}$, в котором происходит пенообразование, привода с механическим пеноразрушителем, видеокамеры. Кроме шкалы на цилиндре, устанавливалась дополнительная шкала для измерения высоты пены. Определение эффективности пеноразрушения проводилось на основе анализа видеозаписи взаимодействия формирующейся в цилиндре модельной пены и выбранного устройства пеноразрушения, при этом выделялись условно мелкодисперсная (размер пузырьков не более 1 мм) и крупнодисперсная (размер пузырьков более 1 мм) пены с низкой (увеличение объема на 100 % за 3...5 с) и высокой (увеличение объема 100 % за 0,5...2,0 с) интенсивностью. Устойчивость исследуемой пены составила 110 с. Для определения эффективности пеноразрушения выбраны двухлопастная (с плоскими лопастями) и пропеллерная мешалки, а также перфорированный вращающийся диск.

Исследуемая пена генерировалась в цилиндре диаметром 70 мм. Для определения эффективности пеноразрушения проведены исследования с мешалками диаметром $0,5d_{ц}$, $0,75d_{ц}$, $0,9d_{ц}$. Число оборотов варьировалось от 100 до 600 об/мин. Результаты анализа эффективности пеноразрушения мелко- и крупнодисперсной пен по предложенному критерию двухлопастной мешалкой с числом оборотов 400 (для малоинтенсивной пены) и 550 об/мин (для высокоинтенсивной) представлены в табл. 2.

В случае применения пропеллерной мешалки использовались мешалки с аналогичными диаметрами (число оборотов от 400 до 800 об/мин). Результаты (число оборотов 400 об/мин) показаны в табл. 2.

При использовании горизонтального вращающегося перфорированного диска (диаметры диска аналогичны диаметрам мешалки) число оборотов его варьировалось от 400 до 600 об/мин. Перфорация диска представляла собой два ряда концентрических отверстий по 8 и 4 отверстия диаметром 0,1 диаметра диска. Результаты анализа эффективности пеноразрушения перфорированным диском при 550 об/мин также представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, крупнодисперсная пена разрушается легче, чем мелкодисперсная. Пена с высокой интенсивностью выделения разрушается

Таблица 2

Оценка эффективности пеноразрушения двухлопастной мешалкой

Диаметр мешалки	Пена			
	мелкодисперсная		крупнодисперсная	
	Интенсивность			
	низкая	высокая	низкая	высокая
Двухлопастная мешалка				
0,5d _ц	1	0	2	0
0,75d _ц	2		3	1
0,9d _ц	3	1	5	2
Пропеллерная мешалка				
0,5d _ц	0	0	1	0
0,75d _ц	1		3	1
0,9d _ц	3	1	4	2
Перфорированный диск				
0,5d _ц	0	0	0	0
0,75d _ц	1		1	
0,9d _ц	2		2	1

медленнее, чем пена с низкой интенсивностью. Чем больше площадь контакта механического воздействия устройства пеноразрушения на пену, тем выше интенсивность пеноразрушения.

Визуальные наблюдения за процессом пеноразрушения выявили эффект формирования вторичной мелкодисперсной пены при взаимодействии механического пеноразрушителя с исходной пеной. При определенных условиях (форме и площади поверхности устройства, скорости движения устройства, интенсивности пенообразования) исходная пена разрушается при взаимодействии с элементами пеноразрушителя, но полной сепарации газовой и жидкой фаз не происходит, а возникает новая вторичная пена, размеры пузырьков которой меньше, чем размеры пузырьков исходной. При этом вторичная пена, как правило, более устойчива, чем исходная. Таким образом, при механическом пеноразрушении необходимо не допускать формирования вторичной пены.

Определение критерия эффективности пеноразрушения

Безразмерный критерий оценки эффективности методов механического пеноразрушения должен учитывать свойства пены, степень механического воздействия на пену пеноразрушителем, а также оценить выявленный эффект формирования вторичной мелкодисперсной пены

$$K = S - (D + U + V + I), \tag{1}$$

где S – степень механического воздействия на пузырек пены; D – дисперсность пены (0 – крупнодисперсная, 1 – мелкодисперсная); U – коэффициент устойчивости пены; V – вероятность формирования вторичной пены; I – интенсивность формирования исходной пены (0 – низкая, 1 – высокая).

Оценим степень механического воздействия на пузырек пены S исходя из геометрической схемы воздействия лопасти на пузырек, представленной на рис. 1,

$$S_0 = (F \cdot l) \sin(90 - \alpha) / (F \cdot l) = \sin(90 - \alpha). \tag{2}$$

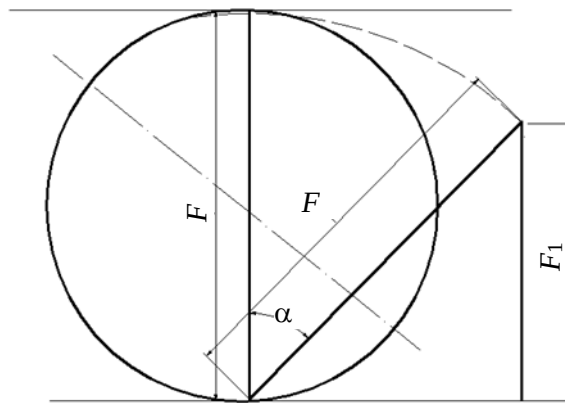


Рис. 1. Схема расчета удельной площади воздействия на пузырек:
 F – условный размер лопасти; F_1 – эффективный условный размер лопасти;
 α – угол наклона лопасти, град.

Исходя из выбранного диапазона значений критерия эффективности (см. табл. 1), запишем выражение для S в виде

$$S = 5OS_0 = 5O \sin(90 - \alpha), \quad (3)$$

где O – доля объема пены, на которую происходит воздействие пеноразрушителем.

Предлагается оценить величину O по доле объема аппарата, в котором происходит воздействие пеноразрушителем. Соответственно, для исследованных диаметров механических пеноразрушителей имеем следующие значения: $0,5d_{ц}O = 0,5$; $0,75d_{ц}O = 0,75$; $0,9d_{ц}O = 1$.

Величина параметра U , характеризующего устойчивость пены, полученная в результате анализа экспериментальных данных, представлена в табл. 3. Вероятность формирования вторичной пены V зависит от параметров S , U , D и скорости вращения устройства. Определение корректного вида зависимости для оценки вероятности формирования вторичной пены является специальной задачей, требующей отдельного исследования. Ориентировочно оценить зависимость V от скорости вращения механического устройства можно по результатам экспериментальных данных (табл. 4).

Таблица 3
Зависимость величины коэффициента U от устойчивости пены

Устойчивость, с	U
Не более 20	0
40	0,5
60	1,0
80	1,5
100 и более	2,0

Таблица 4
Зависимость величины параметра V от скорости вращения

Скорость, об/мин	V
100	0
200	
300	
400	0,2
500	0,4
600	0,6
700	0,8
800	1,0

Таблица 5

Сравнение расчетного и экспериментального значения критерия *K*

Мелкодисперсная пена	Тип механического устройства	d	U	S	D	U	V	I	$K_{\text{эксп}}$	$K_{\text{расч}}$	Δ
Малоинтенсивная	Лопастная мешалка: 400 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$	0,5	2,5	1	0,5	0,2	0	1	0,8	0,2
		$0,75d_{\text{ц}}$		4					2	2,3	0,3
		$0,9d_{\text{ц}}$		5					3	3,3	0,3
Высокоинтенсивная	550 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$		2,5			0,5	1	0	−0,2	−0,2
		$0,75d_{\text{ц}}$		4					0	1	1
		$0,9d_{\text{ц}}$		5					1	2	1
Малоинтенсивная	Пропеллерная мешалка: 400 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$		2			0,2	0	0	0,3	0,3
		$0,75d_{\text{ц}}$		3					1	1,3	0,3
		$0,9d_{\text{ц}}$		4					3	2,3	0,7
	Перфорированный диск: 550 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$		2			0,5		0	0	0
		$0,75d_{\text{ц}}$		2,5					1	0,5	0,5
		$0,9d_{\text{ц}}$		3					2	1	1

Результаты расчета критерия *K* и сравнения с экспериментально полученными значениями для механических пеноразрушителей при разных режимах представлены в табл. 5. Устойчивость исследованной пены составила 44 с. Средний размер пузырьков 0,5 мм.

Заключение

Максимальное расхождение расчетного и экспериментального значений критерия *K* для механических пеноразрушителей при выбранных режимах не превышает 1 (см. табл. 5). Наиболее точно рассчитанный критерий *K* прогнозирует эффективность пеноразрушения для мало- и высокоинтенсивных пен при размерах пеноразрушителя, не перекрывающего полностью весь объем формирующейся пены. Оценки критерия *K*, полученные при разрушении пены устройствами с диаметром, близким к диаметру аппарата, для лопастной мешалки оказались завышенными, для пропеллерной мешалки и перфорированного диска – заниженными, что указывает на необходимость поиска дополнительных факторов, влияющих на степень механического воздействия на пузырек пены. Вероятнее всего, необходим учет влияния стенки аппарата на процесс разрушения пены. Отрицательные значения критерия *K* для режима пеноразрушения плоской мешалкой диаметром 0,5*d*_ц для мелкодисперсной высокоинтенсивной пены при 550 об/мин хорошо коррелируют с наблюдаемым в этом случае активным формированием вторичной пены, замещающей исходную в аппарате.

Оценки параметров критерия эффективности пеноразрушения в исследованных диапазонах свойств пен и конструкций пеноразрушителей удовлетворительно прогнозирует эффективность пеноразрушения. Соответственно, предлагаемый критерий, можно использовать для выбора типа и основных размеров механического пеноразрушителя для пен с параметрами, удовлетворяющими исследованным.

Список литературы

1. Клемпнер, Д. Полимерные пены и технологии вспенивания : пер. с англ. / Д. Клемпнер ; под ред. А. М. Чеботаря. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2009. – 600 с.
2. Тихомиров, В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. К. Тихомиров. – М. : Химия, 1983. – 264 с.
3. Канн, К. Б. Капиллярная гидродинамика пен / К. Б. Канн ; отв. ред. И. Р. Шрейбер ; АН СССР. СО. Ин-т пробл. освоения Севера. – Новосибирск : Наука, 1989. – 166 с.
4. Кругляков, П. М. Пена и пенные пленки / П. М. Кругляков, Д. Р. Ексерова. – М. : Химия, 1990. – 426 с.
5. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.
6. Кларк, Э. Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.
7. ГОСТ Р 50588–2012 Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 2012-09-01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 24 с.

Assessment of the Effectiveness of Mechanical Methods for Foam Destruction

A. N. Pakhomov[✉], D. S. Pekshev, N. Ts. Gatapova, Yu. V. Pakhomova

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
panpost@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: foam dispersion; foaming intensity; mechanical devices; foam separation; synthesis of pigments and dyes; foam stability.

Abstract: The results of systematization of data obtained as a result of experimental studies of the main mechanical methods of destruction of foams formed during the synthesis of pigments and dyes are presented. The purpose of systematization is to obtain a criterion that allows one to numerically evaluate and select a method of foam destruction with maximum indicators for the intensity of gas phase selection without leakage of the liquid phase, and to reasonably select the equipment for the foam destruction process.

References

1. Klempler D., Chebotar' A.M. (Ed.) *Polimernyye peny i tekhnologii vspenivaniya* [Polymer foams and foaming technologies], St. Petersburg: Professiya, 2009, 600 p. (In Russ.)
2. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foams. Theory and practice of their production and destruction], Moscow: Khimiya, 1983, 264 p. (In Russ.)
3. Kann K.B.; Shreyber I.R. (Ed.) *Kapillyarnaya gidrodinamika pen* [Capillary hydrodynamics of foams], Novosibirsk : Nauka, 1989, 166 p. (In Russ.)

4. Kruglyakov P.M., Yekserova D.R. *Pena i pennyye plenki* [Foam and foam films], Moscow: Khimiya, 1990, 426 p. (In Russ.)
 5. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials], Leningrad: Khimiya, 1987, 264 p. (In Russ.)
 6. Klark E.R., Eberkhardt K.N. *Mikroskopicheskiye metody issledovaniya materialov* [Microscopic methods for studying materials], Moscow: Tekhnosfera, 2007, 376 p. (In Russ.)
 7. GOST R 50588-2012. *Penoobrazovateli dlya tusheniya pozharov. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy* [Foaming agents for extinguishing fires. General technical requirements and test methods], Moscow: Standartinform, 2012, 24 p. (In Russ.)
-

Bewertung der Wirksamkeit mechanischer Methoden der Schaumzerstörung

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Systematisierung von Daten vorgestellt, die als Ergebnis experimenteller Studien zu den wichtigsten mechanischen Methoden zur Zerstörung von Schäumen gewonnen worden sind, die bei der Synthese von Pigmenten und Farbstoffen entstehen. Der Zweck der Systematisierung besteht darin, ein Kriterium zu erhalten, das es ermöglicht, eine Methode zur Schaumzerstörung mit maximalen Indikatoren für die Intensität der Gasphasenauswahl ohne Leckage der flüssigen Phase numerisch zu bewerten und die Ausrüstung für den Schaumzerstörungsprozess sinnvoll auszuwählen.

Évaluation de l'efficacité des méthodes mécaniques de destruction des mousses

Résumé: Sont présentés les résultats de la systématisation des données obtenues à la suite des études expérimentales sur les principales méthodes mécaniques de la destruction des mousses formées lors de la synthèse des pigments et des colorants. Le but de la systématisation est d'obtenir un critère permettant d'évaluer et de sélectionner une méthode de destruction des mousses avec des valeurs maximales pour l'intensité de sélection de la phase gazeuse sans passer par la phase liquide, ce qui nécessite de sélectionner la conception matérielle pour le processus de destruction de mousse.

Авторы: *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пекшеев Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пахомова Юлия Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В КАСКАДНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ

В. Я. Борщев✉, Т. А. Сухорукова, Х. Фарур, В. С. Макаров

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
borschov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: каскадный гравитационный смеситель; метод дискретных элементов; процесс смешивания; сыпучий материал.

Аннотация: Исследован процесс смешивания частиц сыпучих материалов в каскадном гравитационном смесителе. Прогнозирование поведения частиц в смесителе выполнено с использованием метода дискретных элементов. Проведено компьютерное моделирование взаимодействия частиц смешиваемых компонентов в смесителе. С помощью программы Altair EDEM получены графические зависимости основных характеристик взаимодействия частиц смешиваемых материалов.

Введение

Гравитационное смешивание сыпучих материалов в настоящее время широко распространено в различных отраслях промышленности. Для его реализации используются смесители, в которых смешиваемые компоненты перемещаются под действием силы тяжести вдоль корпуса и многократно циркулируют и перераспределяются в общем объеме смеси. Достоинства гравитационных смесителей – простота устройства и эксплуатации, отсутствие движущихся частей и низкие энергозатраты. В целях интенсификации процесса смешивания в гравитационных смесителях используют также дополнительное воздействие на сыпучий материал в виде распыления, наложения слоев смешиваемых частиц, неравномерности движения частиц, удара струи сыпучего материала о рабочий орган смесителя и т.д. [1].

Механизм процесса смешивания сыпучих материалов является очень сложным и зависит от большого числа факторов, основными из которых являются конструктивные особенности смесителя и режим его работы. Как правило, процесс смешивания сыпучих материалов реализуется в результате активного взаимодействия частиц. Качество готовой смеси в значительной степени зависит от взаимного столкновения частиц друг с другом, с корпусом смесителя и его рабочими элементами [2 – 5].

Компьютерное моделирование процесса взаимодействия частиц сыпучих материалов в гравитационном смесителе

Для разработки эффективных конструкций смесителей необходимо располагать данными об изменении кинетических и динамических характеристик частиц сыпучих материалов в процессе их взаимодействия в смесителе. Однако такие данные в некоторых случаях либо трудно определить путем проведения прямого

эксперимента, либо вообще невозможно получить. В таких случаях в исследовательской практике достаточно широко применяется вычислительный эксперимент, отличающийся высокими прогностическими возможностями.

В настоящей работе проведено исследование процесса взаимодействия частиц сыпучих материалов в гравитационном смесителе с помощью компьютерного моделирования.

В работе [6] разработан смеситель для сыпучих материалов, в котором смесь требуемого качества формируется в процессе интенсивного перемещения перемешиваемого материала по вертикальному цилиндрическому корпусу. Существенное повышение эффективности процесса смешивания обеспечивается за счет использования устройств, установленных друг над другом по высоте корпуса (рис. 1). В качестве таких устройств применяются разрыхлители потока сыпучего материала, с помощью которых в смесителе организуются множество параллельных разрыхленных потоков материала. Интенсификации перемешивания параллельных потоков материала способствуют также наклонные кронштейны, установленные каскадами с противоположными углами наклона в зазоре между пересыпными воронками и корпусом смесителя. В результате обеспечивается интенсивное взаимопроникновение частиц сыпучего материала и улучшается качество готового продукта за счет однородного объемного распределения частиц материала в корпусе смесителя.

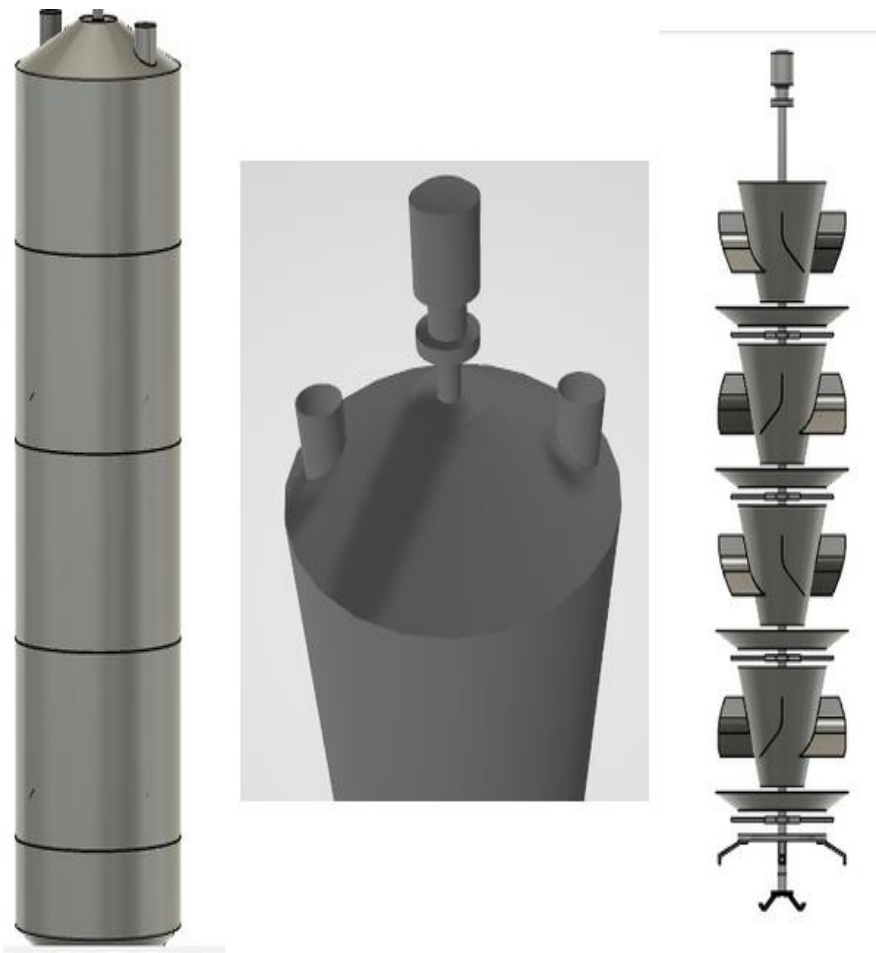


Рис. 1. 3D-модель каскадного гравитационного смесителя сыпучего материала

Исследование взаимодействия частиц сыпучих материалов в разработанной конструкции смесителя проведено с использованием метода дискретных элементов, позволяющего отслеживать траекторию движения каждой частицы с учетом взаимных столкновений частиц, а также их контакта со стенками оборудования [7 – 10].

Компьютерное моделирование с помощью метода дискретных элементов реализовано в программе Altair EDEM. На первом этапе в программу импортирован чертеж разработанного устройства для смешивания сыпучих материалов из Autodesk Fusion 360. Затем в программу введены исходные данные, описывающие работу смесителя, заданы тип и основные свойства частиц сыпучего материала для анализа поведения частиц в смесителе в активном гидродинамическом режиме в программе Altair EDEM. Для наглядного графического представления движения частиц материала, перемешиваемых в устройстве, им присваиваются различные цвета. Программа выдает видеофайл, иллюстрирующий движение частиц сыпучего материала в корпусе смесителя.

Результаты моделирования и обсуждение

Исследование взаимодействия частиц сыпучего материала в смесителе проведено при различных соотношениях смешиваемых компонентов: 1 : 1, 1 : 3 и 1 : 5. В качестве модельных материалов использованы частицы полиэтилена и полистирола. В процессе смешивания в корпусе смесителя наблюдается активное взаимодействие частиц, приводящее к изменению количества их взаимных контактов. При движении вдоль корпуса смесителя частицы вступают во взаимодействие с соседними частицами и поверхностями рабочих элементов установки, хаотически меняют свою скорость и направление движения, импульс. Метод дискретных элементов позволяет учитывать положение и направление движения каждой частицы и проводить перерасчет ее кинематических и динамических параметров через определенный промежуток времени с учетом взаимодействия с другими частицами.

Зависимости изменения числа контактов частиц в процессе их смешивания представлены на рис. 2. Как следует из рисунка, с течением времени процесса смешивания сыпучих материалов наблюдается более интенсивное взаимодействие частиц. Кроме того, в процессе исследования установлено, что при практически одинаковом ходе полученных графических зависимостей при разном соотношении компонентов смеси имеет место различная интенсивность взаимодействия частиц.

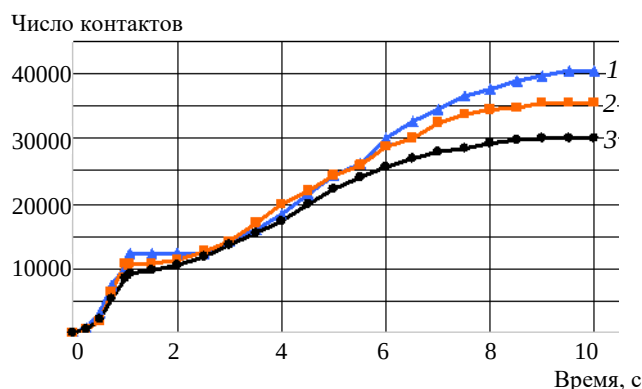


Рис. 2. Число контактов частиц во времени при соотношениях смешиваемых компонентов:
1 – 1 : 1; 2 – 1 : 3; 3 – 1 : 5

При большем соотношении смешиваемых компонентов с течением времени количество контактов несколько уменьшается (см. рис. 2, кривые 2 и 3), что обусловлено взаимодействием частиц в более стесненных условиях. Следует отметить, что приведенные графические зависимости отражают все контакты и перекрытия между частицами (перекрытие двух контактирующих частиц оценивается как деформация, необходимая для того, чтобы они физически могли находиться в их фактической конфигурации).

На рисунке 3 представлено изменение во времени нормальной силы, действующей на частицу. Под нормальной понимается сила, возникающая при непосредственном контакте частиц друг с другом в корпусе смесителя. В начальный момент времени наблюдается быстрое увеличение, а затем уменьшение силового воздействия на частицу, которое через некоторое время практически стабилизируется на определенном уровне. Это свидетельствует о достаточно стабильном силовом воздействии на частицы в рабочей камере смесителя. Причем величина нормальной силы незначительно зависит от соотношения смешиваемых компонентов. В то же время следует отметить, что при соотношении смешиваемых компонентов 1 : 1 (см. рис. 3, кривая 1) величина нормальной силы, действующей на частицы, несколько меньше по сравнению с другими соотношениями.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что в разработанной конструкции каскадного смесителя частицы компонентов смеси активно взаимодействуют друг с другом при различном их соотношении.

Увеличение скорости взаимодействия потоков смешиваемых частиц, как правило, вызывает возрастание скорости процесса смешивания и приводит к повышению однородности смеси. Вследствие этого большой практический интерес имеет возможность прогнозирования кинетических характеристик частиц смешиваемых материалов, таких как скорость движения частиц и их кинетическая энергия.

Известно, что качество смешивания в значительной мере зависит от кратности перемещения в смесителе объема смешиваемых материалов. Кратность перемещения частиц в свою очередь в значительной степени определяется скоростью их перемещения. На рисунке 4, а, представлены зависимости изменения скорости движения частиц материала, участвующих в процессе смешивания. Очевидно, что скорость движения частиц на одной ступени перемешивания в каскадном гравитационном смесителе с течением времени существенно меняется от максимального значения на входе до минимального на выходе.

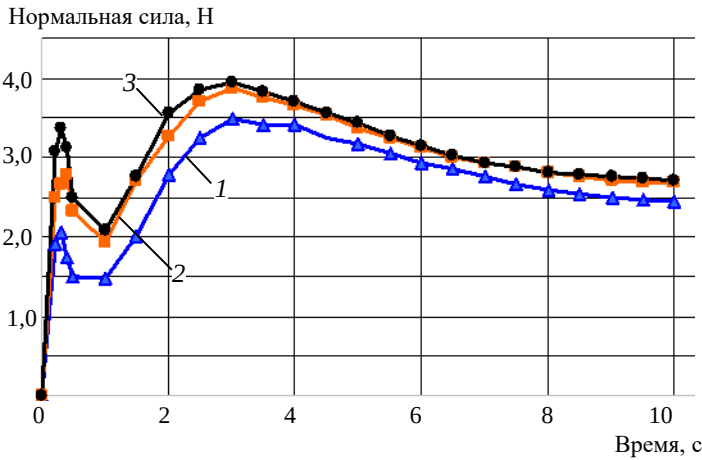


Рис. 3. Изменение нормальной силы, действующей на частицы, во времени при соотношениях смешиваемых компонентов:
1 – 1 : 1; 2 – 1 : 3; 3 – 1 : 5

Это обусловлено увеличением числа контактов частиц в процессе их движения вдоль корпуса смесителя и, соответственно, роста сопротивления, вызываемого взаимодействием с окружающими частицами. Вследствие этого для повышения эффективности процесса смешивания необходимы дополнительные воздействия на поток материала с помощью разрыхлителей, обеспечивающих условия для более интенсивного перераспределения частиц в смешиваемом объеме.

Степень активности взаимных перемещений частиц сыпучего материала определяет интенсивность протекания в нем процесса перемешивания. Следовательно, для интенсификации процесса смешивания необходимо обеспечивать такие условия взаимодействия частиц, которые способствуют повышению энергии их взаимных перемещений. Поэтому значительный практический интерес представляет прогнозирование значений кинетической и полной (сумма кинетической энергии, кинетической энергии вращения и потенциальной энергии частицы) энергии частиц сыпучего материала в процессе смешивания [11, 12].

В процессе взаимодействия частицы изменяют свою кинетическую энергию (см. рис. 4, б), что обусловлено их активным взаимодействием как с окружающими частицами, так и с рабочими органами смесителя в процессе смешивания. Причем величина кинетической энергии частиц при равном соотношении смешиваемых компонентов больше, чем при других условиях перемешивания. Это обусловлено более высокой скоростью частиц в менее стесненных условиях взаимодействия.

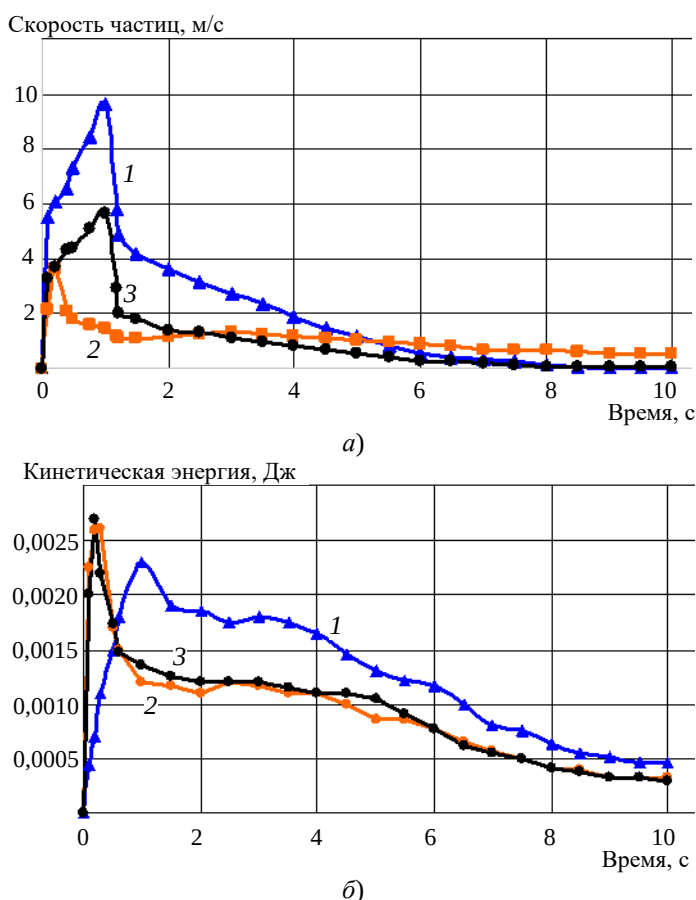


Рис. 4. Зависимости скорости (а) и кинетической энергии (б) частиц во времени при соотношениях смешиваемых компонентов:
 1 – 1 : 1; 2 – 1 : 3; 3 – 1 : 5

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в разработанной конструкции каскадного гравитационного смесителя, характеризующейся активным гидродинамическим режимом, обеспечиваются достаточно стабильные условия взаимодействия частиц сыпучих материалов, а также имеются хорошие возможности для интенсификации процесса смешивания.

Заключение

EDEM-моделирование позволяет изучить поведение среды, состоящей из частиц, движущихся независимо друг от друга и взаимодействующих с другими частицами в точках их контакта. Проведено компьютерное моделирование взаимодействия частиц сыпучих материалов с помощью метода дискретных элементов. Получены графические зависимости основных характеристик взаимодействия частиц смешиваемых материалов в программе Altair EDEM. Показана возможность прогнозирования поведения частиц сыпучих материалов при их взаимодействии в каскадном гравитационном смесителе. Полученные результаты моделирования могут быть использованы при проектировании гравитационных смесителей.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Основные тенденции совершенствования отечественного, оборудования для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Макаров, Г. Д. Сальникова // Нефтяное и химическое машиностроение. – 1993. – № 10. – С. 5 – 8.
2. Верлока, И. И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И. И. Верлока, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. – 10 с. URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599 (дата обращения: 10.03.2024).
3. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
4. Демин, О. В. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов / О. В. Демин, М. М. Свиридов, В. Ф. Першин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 1. – С. 97 – 99.
5. Борщев, В. Я. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов в смесителях гравитационного типа / В. Я. Борщев, Х. Фарур, В. С. Макаров, Г. В. Кокунов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 653 – 665. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665.
6. Пат. 195175 Российская Федерация, МПК В01F 7/18 (2006.01). Усреднитель сыпучих материалов / В. Я. Борщев, Т. А. Сухорукова, Ю. А. Феоклистов, В. В. Матюкин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2019135016 ; заявл. 31.10.2019 ; опубл. 16.01.2020, Бюл. № 2. – 6 с.
7. Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29, No. 1. – P. 47 – 65. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47
8. Алиев, Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
9. Клишин, С. В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале / С. В. Клишин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 12. – С. 273 – 277.
10. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов / В. А. Арсентьев [и др.] // Обогащение руд. – 2010. – № 1. – С. 30 – 35.

11. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности сегрегации при быстром гравитационном течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов, О. О. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2006. – Т. 40, № 4. – С. 423 – 425.

12. Долгунин, В. Н. «Температура» зернистой среды и физические эффекты взаимодействия частиц при быстром сдвиговом течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 8. – С. 78 – 82.

A Study of the Interaction of Bulk Material Particles in a Cascade Gravitational Mixer

V. Ya. Borshchev✉, T. A. Sukhorukova, H. Faarour, V. S. Makarov

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
borschov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: cascade gravitational mixer; discrete element method; mixing process; bulk material.

Abstract: The process of mixing particles of bulk materials in a cascade gravitational mixer has been studied. Prediction of the behavior of particles in the mixer was carried out using the discrete element method. A computer simulation of the interaction of particles of mixed components in a mixer was carried out. Using the Altair EDEM program, graphical dependences of the main characteristics of the interaction of particles of mixed materials were obtained.

References

1. Makarov Yu.I., Sal'nikova G.D. [Main trends in improving domestic equipment for mixing bulk materials], *Neftyanoye i khimicheskoye mashinostroyeniye* [Oil and chemical engineering], 1993, no. 10, pp. 5-8. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Verloka I.I., Kapranova A.B., Lebedev A.Ye. [Modern continuous gravitational devices for mixing bulk components], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2014, no. 4, 10 p. available at: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599 (accessed 04 March 2024). (In Russ.)
3. Makarov Yu. I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatuses for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
4. Demin O.V., Sviridov M.M., Pershin V.F. [Ways to increase the efficiency of mixing bulk materials], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of universities. Chemistry and chemical technology], 2010, vol. 53, no. 1, pp. 97-99. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Borshchev V. Ya., Farur Kh., Makarov V.S., Kokunov G.V. [Ways to increase the efficiency of mixing bulk materials in gravity-type mixers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 653-665. doi:10.17277/vestnik.2023.04. pp.653-665 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Borshchev V.Ya., Sukhorukova T.A., Feoklistov Yu.A., Matyukin V.V. *Usrednitel' sypuchikh materialov* [Bulk materials homogenizer], Russian Federation, 2020, Pat. 195175 (In Russ.)
7. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 1979, vol. 29, no. 1, pp. 47-65. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47

8. Aliyev T.I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of modeling discrete systems], St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (In Russ.)

9. Klishin C.B. [Application of the discrete element method in the analysis of gravitational movement of granular material in a converging channel], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2009, no. 12, pp. 273-277. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Arsent'yev V.A. [et al.], [Methods of dynamics of particles and discrete elements as a tool for research and optimization of processes of processing natural and man-made materials], *Obogashcheniye rud* [Ore enrichment.], 2010, no. 1, pp. 30-35. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Dolgunin V.N., Ukolov A.A., Ivanov O.O. [Kinetic patterns of segregation during rapid gravitational flow of granular materials], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology.], 2006, vol. 40, no. 4, pp. 423-425. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya. [“Temperature” of a granular medium and physical effects of particle interaction during rapid shear flow of granular materials], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of universities. Chemistry and chemical technology], 2007, vol. 50, no. 8, pp. 78-82 (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der Partikelinteraktion von Schüttgütern in einem Kaskaden-Gravitationsmischer

Zusammenfassung: Der Prozess des Mischens von Schüttgutpartikeln in einem Kaskaden-Gravitationsmischer ist untersucht. Die Vorhersage des Verhaltens von Partikeln im Mischer ist mit der Methode der diskreten Elemente erfüllt. Es ist eine Computermodellierung der Interaktion von Partikeln aus gemischten Bestandteilen im Mischer durchgeführt. Unter Verwendung des Altair EDEM-Programms sind grafische Abhängigkeiten der Hauptmerkmale der Wechselwirkung zwischen den Partikeln der gemischten Materialien ermittelt.

Étude de l'interaction des particules de matériaux en vrac dans un mélangeur gravitationnel en cascade

Résumé: Est étudié le processus de mélange des particules en vrac dans un mélangeur à gravité en cascade. Est réalisé le pronostique du comportement des particules dans le mélangeur en utilisant la méthode des éléments discrets. Est réalisée une simulation informatique de l'interaction des particules des composants mélangés dans le mélangeur. A l'aide du logiciel Altair EDEM sont obtenues les dépendances graphiques des principales caractéristiques d'interaction des particules des matériaux mélangés.

Авторы: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Сухорукова Татьяна Александровна* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Фарур Хамза* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Макаров Вадим Сергеевич* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

СТРУКТУРНО-ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АКТИВАЦИИ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

И. Н. Шубин^{1✉}, А. А. Попова²

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов» (1),
i.shubin77@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
департамент по корпоративным коммуникациям
АО «ПРОГРЕСС» (2), Липецк, Россия*

Ключевые слова: активированный углеродный материал; высокотемпературная активация; декомпозиция; структурная схема; технологический процесс.

Аннотация: Рассмотрен процесс высокотемпературной активации углеродного материала. На основе функционально-иерархического подхода разработана структурная схема взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующая технологию получения высокопористого углеродного материала. Показаны особенности компоновки технологического оборудования, позволяющие решить задачу по совершенствованию имеющегося и разработке нового с учетом особенностей протекающих процессов. В результате установлена возможность повышения производительности, эффективности и безопасности реализации данного процесса, конкурентоспособности технологии и полученного активированного высокопористого углеродного материала, а также перехода от лабораторных исследований к его промышленной реализации.

Введение

Высокопористые углеродные материалы (ВУМ) относятся к наиболее динамично развивающемуся классу функциональных материалов и востребованы во многих отраслях промышленности: химической, радиоэлектронной, энергетике и многих др. Обладая высокой удельной поверхностью – более 2000 м²/г, объемом пор более 1 см³/г, в сочетании с размерами, находящимися в наноразмерном диапазоне, они являются наиболее универсальными и эффективными для применения в различных сорбционных процессах [1, 2].

При производстве данных материалов осуществляется сложный многостадийный химический процесс, заключающийся в активации различного предварительно карбонизированного углеродного сырья разными жидко- или газофазными реагентами, например, водяным паром, кислотами или щелочами, что позволяет получить значительную удельную поверхность и высокопористую наноразмерную структуру [3 – 5].

Проведенные предварительные исследования и анализ литературных источников показали, что данные параметры полученных высокопористых углеродных материалов зависят в первую очередь от режимов активации (массового соотношения активируемых компонентов в реакционной смеси, температуры и продолжительности процесса, режима газообмена и др.), а также, в меньшей степени,

от исходных компонентов, применяемых для получения углеродсодержащих веществ (карбонизатов), и вида активатора [6 – 9].

При этом особое внимание в подобных исследованиях уделяется подбору и исследованию исходного состава активируемого материала, отработке отдельных технологических режимов и диагностике, а работы носят явный исследовательский характер и проводятся в лабораторных условиях [10 – 13]. Несмотря на всю актуальность проводимых исследований, практически не рассматриваются вопросы выхода технологии на промышленный уровень и разработки нового или совершенствования имеющегося оборудования.

Во многих работах обсуждаются общие вопросы проектирования технологического оборудования, основанные на классических подходах и рекомендациях, которые, однако, не всегда учитывают особенности процесса получения ВУМ [14 – 18]. Другие работы посвящены математическому моделированию сложных химических процессов, их недостатком является большое количество допущений, что сильно ограничивает применимость результатов при переходе к практической реализации [19, 20]. В целом ряде работ предлагаются готовые конструктивные решения или технологии, реализация которых возможна в строго ограниченных граничных условиях реализуемого процесса [21, 22].

Ряд авторов рассматривает общий подход к структуризации сложных химических процессов, попытке установления иерархии протекающих процессов, применяемого оборудования, последовательности выполняемых операций, который носит или рекомендательный, или жестко привязанный к определенным условиям характер [23, 24]. В результате, известные работы не позволяют ответить на ряд практических вопросов, возникающих при аппаратно-технологическом оформлении процесса высокотемпературной активации углеродного материала, а именно насколько рационально построен процесс при переходе от лабораторных исследований к промышленному производству и какие этапы или стадии производства, и, соответственно, какое оборудование являются ключевыми.

Цель работы – разработка структурно-иерархической схемы взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующей технологию получения высокопористого углеродного материала, представляющей особенности компоновки оборудования и позволяющей решить задачи по совершенствованию имеющегося и разработке нового оборудования с учетом особенностей протекающих процессов.

Объекты и методы исследования

В общем виде высокотемпературная активация углеродного материала представляет собой процесс ступенчатой термической обработки и выдержки реакционной смеси – карбонизата с активатором (в заданном соотношении) в диапазоне 400...900 °С в инертной среде. В процессе термообработки реакционной смеси протекают многочисленные химические реакции, обеспечивающие образование высокопористой структуры активируемого материала. Предварительные исследования данного процесса, в результате которого получен высокопористый углеродный материал, позволили определить оптимальные режимные параметры (исходное углеродное сырье для карбонизата – смесь декстрина и оксида графена, активатор – гидроксид калия (KOH), соотношение компонентов реакционной смеси карбонизат : KOH – 1 : 3, температурный диапазон активации 400...750 °С, продолжительность основной стадии – 2 часа, расход инертного газа – 1,3 л/мин), [25].

Результаты исследования и их обсуждение

На основе функционально-иерархического подхода разработана структурно-иерархическая схема взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующая технологию получения высокопористого углеродного материала (рис. 1).

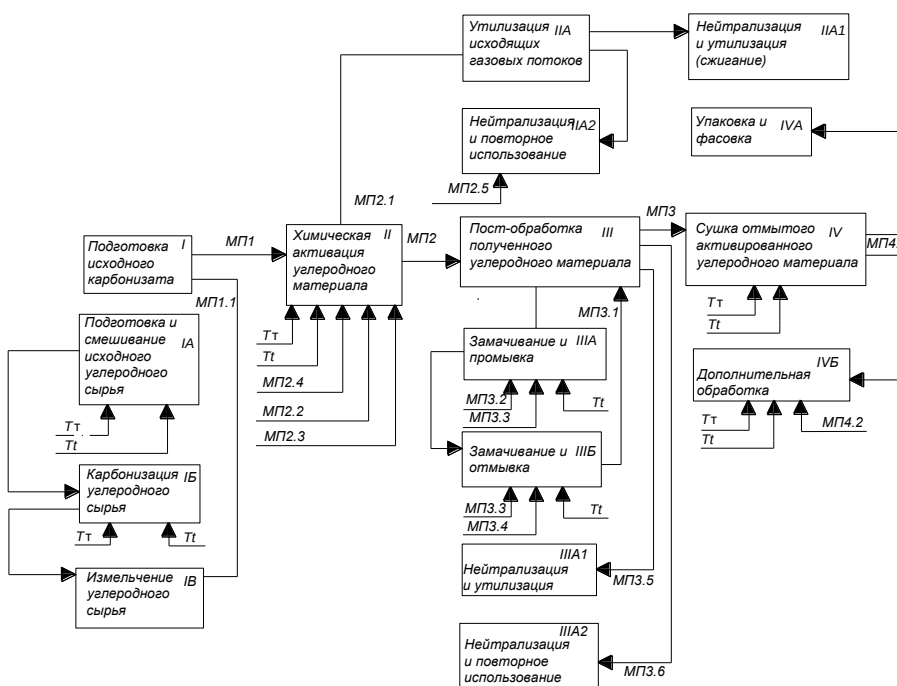


Рис. 1. Структурно-иерархическая схема взаимодействия оборудования и материальных потоков при реализации процесса высокотемпературной активации углеродного материала

Технология высокотемпературной активации углеродного материала состоит из *четырёх* уровней с соответствующей декомпозицией.

Первый уровень декомпозиции (I) – *подготовка исходного карбонизата* (основной материальный поток (МП1) – включает в себя следующие этапы:

- *подготовку и смешивание исходных компонентов (IA)* – приготовление углеродного сырья (при необходимости и отдельные *стадии* – предварительную дополнительную обработку исходных компонентов – измельчение, просеивание, ультразвуковую обработку, растворение и т.д.(на схеме не показаны);
- *карбонизацию исходного сырья (ИБ)*;
- *измельчение углеродного сырья* (полученного карбонизата) (IB).

Результатом рассмотренных этапов является вспомогательный материальный поток (МП1.1) – карбонизат.

Для этого применяются соответствующие технологические процессы и типовое оборудование: смесители, печь, диспергаторы и т.д. Причем каждый из этапов и его особенности (такие технологические режимы, как продолжительность процесса T_t , температура T_t и т.д.) зависят, прежде всего, от исходных свойств материалов.

Второй уровень (II) – *химическая активация углеродного материала (карбонизата)* – основной для рассматриваемого технологического процесса высокотемпературной активации, зависит напрямую от предыдущего (по карбонизату) и привлекаемых технологических режимов и потоков. На данном уровне протекает сложная технологическая реакция – щелочная активация карбонизата в инертной среде. Данный процесс управляем по материальным потокам: объему инертного газа (скорости прокачки) (МП2.1), соотношению активируемых компонентов (карбонизата МП1.1 и гидроксида калия КОН (МП2.3) и технологическим

режимам – (T_t и T_t), которые напрямую определяют параметры готового углеродного материала (его качество, то есть соответствие предъявляемым требованиям по характеристикам). Опционально на этом уровне возможен еще один вспомогательный материальный поток, влияющий на процесс активации – водяной пар (МП2.4). Процесс проводится в реакторе, спроектированном в соответствии с предъявляемыми требованиями (конструктивными и технологическими), итогом которого является активированный углеродный материал (МП2).

Результатом осуществления данного уровня является этап (IIА) – *утилизация исходящих газовых потоков* (МП2.1), для реализации которого возможно проведение одной из двух *стадий*: *нейтрализации и утилизации* (IIА1), которые проводятся в нейтрализаторе для обеспечения безопасности, или *стадии нейтрализации и повторного использования* (IIА2) части исходящих газов (например, конденсация паров калия и нейтрализация их водой (МП2.5)) для повторного использования, для чего могут быть применены типовое оборудование и технологии.

Третий уровень (III) – *пост-обработка полученного углеродного материала*, включает в себя несколько этапов, которые проводятся с использованием известных технологий и типового оборудования:

- *замачивание и промывка* (IIIА) активированного углеродного материала с целью удаления примесей (прежде всего соединений калия), а также *стадия нейтрализации и утилизации* промывных вод. Характеризуется наличием вспомогательных материальных потоков – дистиллированной воды (МП3.2), промывной воды (МП3.3) и T_t ;

- *замачивание и отмывка* (IIIБ) активированного углеродного материала с целью удаления примесей (прежде всего соединений железа), а также этапы *нейтрализации и утилизации* промывных вод (соляная кислота HCl – (МП3.4) промывная вода (МП3.3) и T_t . С получением на выходе активированного углеродного материала заданной чистоты (МП 3.1).

На данном уровне возможно осуществление *стадий нейтрализации и утилизации* (IIIА1) или *нейтрализации и повторного использования* (IIIА2) – использованных промывной воды и кислоты (потоки МП3.5 и МП3.6). Результатом данного уровня является отмытый полученный углеродный материал (МП3).

Четвертый уровень (IV) – *сушка отмытого* (рН-нейтрального) *активированного углеродного материала* осуществляется в сушильном шкафу (технологические режимы T_t и T_t) – стандартном оборудовании, и заканчивается этапом *упаковки и фасовки* (IVА) готового активированного углеродного материала (МП4.1) или проведением *дополнительной обработки* (IVБ) для придания ВУМ определенных свойств (функционализации) для чего возможно применение активаторов (МП 4.2), а также T_t и T_t , как основных технологических режимов.

Анализируя структурно-иерархическую схему, реализующую технологию получения активированного высокопористого углеродного материала, и сопоставляя ее с результатами экспериментальных исследований, отметим, что основным по влиянию на характеристики готового продукта будет являться второй уровень – *химическая активация карбонизата*, предусматривающий, как уникальное оборудование (реактор активации), так и целый ряд варьируемых режимных факторов. Другие же этапы и стадии будут определяться, прежде всего, гарантированным временем протекания технологических процессов и применением типового оборудования.

Заключение

Таким образом, рассмотрев процесс высокотемпературной активации углеродного материала, разработана структурно-иерархическая схема взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующая технологию получения высокопористого углеродного материала. Данная схема позволила наглядно, с учетом особенностей протекающих процессов, представить особенности компо-

новки оборудования при решении задачи проектирования аппаратурно-технологического оформления процесса высокотемпературной химической активации и установить, что при совершенствовании имеющегося и разработке нового оборудования следует отталкиваться от конструкции реактора активации, конструктивных и технологических способов интенсификации протекающих в нем процессов. В результате повысить эффективность и безопасность осуществления рассматриваемого процесса, конкурентоспособность технологии и получаемого активированного высокопористого углеродного материала, а также облегчить переход от лабораторных исследований к его промышленной реализации.

Список литературы

1. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы: производство свойство применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Фенелонов, В. Б. Пористый углерод / В. Б. Фенелонов. – Новосибирск : Институт катализа СО РАН, 1995. – 518 с.
3. Popova, A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // *Advanced Materials and Technologies*. – 2020. – No. 3(19). – P. 28 – 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
4. Пат. № 2620404 Российская Федерация, МПК C01B 31/08. Способ получения мезопористого углерода / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, Г. В. Соломахо ; заявитель и патентообладатель «НаноТехЦентр» ; заявл. 26.01.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15. – 19 с.
5. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев. – М. : ИД «Спектр», 2013. – 152 с.
6. Пат. № 2736586 Российская Федерация, МПК B01J 20/20 , B01J 20/30. Формованный наноструктурированный микропористый углеродный сорбент и способ его получения / А. Г. Ткачев, Н. Р. Меметов, А. Е. Кучерова, А. В. Мележик, А. Д. Зеленин, А. А. Попова, И. Н. Шубин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2019121997 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 18.11.2020, Бюл. № 32. – 7 с.
7. Попова, А. А. Исследование влияния технологических параметров на аппаратурное оформление процесса производства активированного углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение и машиноведение*. – 2022 .– № 1(742). – С. 20 – 30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30
8. Surface Functionality and Porosity of Activated Carbons Obtained from Chemical Activation of Wood / H. Benaddi, T. J. Bandosz, J. Jagiello, J. A. Schwarz, J. N. Rouzaud, D. Legras, F. Beguin // *Carbon*. – 2000. – Vol. 38, No. 5. – P. 669 – 674. doi:10.1016/S0008-6223(99)00134-7
9. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы / Н. В. Чесноков, Н. М. Микова, И. П. Иванов, Б. Н. Кузнецов // *Журнал Сибирского федерального университета*. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 42 – 53.
10. Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene / Y. Zhu, S. Murali, M. D. Stoller, K. J. Ganesh, W. Cai, P. J. Ferreira, A. Pirkle, R. M. Wallace, K. A. Cychosz, M. Thommes, D. Su, E. A. Stach, R. S. Ruoff // *Science*. – 2011. – Vol. 332, No. 6037. – P. 1537 – 1541. doi:10.1126/science.1200770
11. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen / D. Lozano-Castello, J. M. Calo, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano // *Carbon*. – 2007. – Vol. 45, No. 13. – P. 2529 – 2536. doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.021

12. Influence of the Activation Conditions on the Porosity Development of Herringbone Carbon Nanofibers / V. Jiménez, J. A. Díaz, P. Sánchez, J. L. Valverde, A. Romero // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – Vol. 155, No. 3. – P. 931 – 940. doi: 10.1016/j.cej.2009.09.035
13. Teng, H. Preparation of Porous Carbons from Phenol-Formaldehyde Resins with Chemical and Physical Activation / H. Teng, S.-C. Wang // *Carbon*. – 2000. – Vol. 38, No. 6. – P. 817 – 824. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00160-8
14. Хейфец, М. Л. Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного и субтрактивного производства / М. Л. Хейфец // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2020. – № 11(113). – С. 40 – 48. doi: 10.30987/2223-4608-2020-11-40-48
15. Теоретические основы проектирования технологических комплексов : монография / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 239 с.
16. Чижик, С. А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С. А. Чижик, М. Л. Хейфец, С. А. Филатов // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2014. – № 4(29). – С. 68 – 74.
17. Пухальский, В. А. Иерархия процессов в технологии машиностроения / В. А. Пухальский // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2015. – № 6 (314). – С. 108 – 113.
18. Методика проектирования аппаратурного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе / А. В. Рухов, Д. В. Таров, Т. П. Дьячкова [и др.]. // *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*. – 2019 – Т. 62, № 3. – С. 94 – 101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959
19. Kookos, K. Regulatory Control Structure Selection of Linear Systems / K. Kookos, J. D. Perkins // *Computers & Chemical Engineering*. – 2002. – Vol. 26, Is. 6. – P. 875 – 887. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00013-3
20. Borisenko, A. B. Hierarchy of Processing Equipment Configuration Design Problems for Multiproduct Chemical Plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2014. – Vol. 53, No. 3. – P. 410 – 419. doi: 10.1134/S1064230714030046
21. Niu, J. J. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes / J. J. Niu, J. N. Wang // *Solid State Sciences*. – 2008. – Vol. 10, No. 9. – P. 1189 – 1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016
22. Enhanced Capacitance of Carbon Nanotubes through Chemical Activation / E. Frackowiak, S. Delpeux, K. Jurewicz, K. Szostak, D. Cazorla-Amoros, F. Beguin // *Chemical Physics Letters*. – 2002. – Vol. 361, No. 1. – P. 35 – 41. doi: 10.1016/S0009-2614(02)00684-X
23. A Hierarchical Approach for the Redesign of Chemical Processes / I. Lopez-Arevalo, R. Banares-Alcantara, A. Aldea, A. Rodriguez-Martinez // *Knowledge and Information Systems*. – 2007. – Vol. 12, No. 2. – P. 169 – 201. doi: 10.1007/s10115-006-0060-4
24. Zhou, Y. M. Designing for Complexity: Using Divisions and Hierarchy to Manage Complex Tasks // Y. M. Zhou // *Organization Science*. – 2012. – Vol. 24, No. 2. – P. 339 – 355. doi: 10.1287/orsc.1120.0744
25. Попова, А. А. Аппаратурно-технологическое оформление производства активированного углеродного материала / А. А. Попова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 318 – 327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327

The Structural-Hierarchical Scheme of the Process of High-Temperature Activation of Carbon Material

I. N. Shubin^{1✉}, A. A. Popova²

*Department of Equipment and Technology of Nanomaterials Manufacturing(1),
i.shubin77@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia;*

Corporate Communications Department JSC "PROGRESS" (2), Lipetsk, Russia

Keywords: high-temperature activation; block diagram; technological process; decomposition; activated carbon material.

Abstract: The paper considers the process of high-temperature activation of carbon material. On the basis of a functional-hierarchical approach, a block diagram of the interaction of equipment and material flows has been developed, which implements the technology for producing highly porous carbon material, clearly presents the features of the equipment layout and allows solving the problems of improving existing equipment and developing new equipment, taking into account the characteristics of ongoing processes, which will increase productivity, efficiency and the safety of the implementation of this process, the competitiveness of the technology and the resulting activated highly porous carbon material, and will also facilitate the transition from laboratory research to its industrial implementation.

References

1. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy: proizvodstvo svoystvo primeneniye* [Carbon nanomaterials: production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
2. Felonov V.B. *Poristyy uglerod* [Porous carbon], Novosibirsk: Institut kataliza SO RAN, 1995, 518 p. (In Russ.)
3. Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis, *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3(19), pp. 28-32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
4. Tkachev A.G., Melezhik A.V., Solomakho G.V. *Sposob polucheniya mezoporistogo ugleroda* [Method for producing mesoporous carbon], Russian Federation, Pat. 2620404 (In Russ.)
5. D'yachkova T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* [Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes], Moscow: Spektr, 2013, 152 p. (In Russ.)
6. Tkachev A.G., Memetov N.R., Kucherova A.Ye., Melezhik A.V., Zelenin A.D., Popova A.A., Shubin I.N. *Formovanny nanostrukturirovanny mikroporistyy uglerodnyy sorbent i sposob yego polucheniya* [Molded nanostructured microporous carbon sorbent and the method of its production], Russian Federation, 2020, Pat № 2736586 (In Russ.)
7. Popova A.A., Shubin I.N. [Study of the influence of technological parameters on the hardware design of the production process of activated carbon material], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering and mechanical science], 2022, no. 1(742), pp. 20-30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Benaddi N., Badosz T.J., Jagiello J., Schwarz J.A., Rouzaud J.N., Legras D., Beguin F. Surface Functionality and Porosity of Activated Carbons Obtained from Chemical Activation of Wood, *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669-674. doi:10.1016/S0008-6223(99)00134-7

9. Chesnokov N.V., Mikova N.M., Ivanov I.P., Kuznetsov B.N. [Production of carbon sorbents by chemical modification of fossil coals and plant biomass], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta* [Journal of the Siberian Federal University], 2014, vol. 7, no. 1, pp. 42-53. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Zhu Y., Murali S., Stoller M.D., Ganesh K.J., Cai W., Ferreira P.J., Pirkle A., Wallace R.M., Cychosz K.A., Thommes M., Su D., Stach E.A., Ruoff R.S. Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene, *Science*, 2011, vol. 332, no. 6037, pp. 1537-1541. doi:10.1126/science.1200770
11. Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen, *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 13, pp. 2529-2536. doi:10.1016/j.carbon.2007.08.021
12. Jiménez V., Díaz J.A., Sánchez P., Valverde J.L., Romero A. Influence of the Activation Conditions on the Porosity Development of Her-ringbone Carbon Nanofibers, *Chemical Engineering Journal*, 2009, vol. 155, no. 3, pp. 931-940. doi:10.1016/j.cej.2009.09.035
13. Teng H., Wang S.-C. Preparation of Porous Carbons from Phenol-Formaldehyde Resins with Chemical and Physical Activation, *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 817-824. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00160-8
14. Kheyfets M.L. [Design of technological equipment complexes for additive and subtractive production], *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering], 2020, no. 11(113), pp. 40-48. doi:10.30987/2223-4608-2020-11-40-48 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Rusetskiy A.M., Vityaz' P.A., Kheyfets M.L. [et al.]. *Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov: monografiya* [Theoretical foundations of the design of technological complexes: monograph], Minsk: Belaruskaya navuka, 2012, 239 p. (In Russ.)
16. Chizhik S.A., Kheyfets M.L., Filatov S.A. [Prospects for the development of technological complexes for additive synthesis of composite materials and product shaping], *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2014, no. 4(29), pp. 68-74. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Pukhal'skiy V.A. [Hierarchy of processes in mechanical engineering technology], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2015, no. 6 (314), pp. 108-113. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P. [et al.]. [Methodology for designing hardware for the production of carbon nanotubes and semi-products based on them], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Ser. Chemistry and chemical technology], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94-101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959 (In Russ., abstract in Eng.)
19. Kookos K., Perkins J.D. Regulatory Control Structure Selection of Linear Systems, *Computers & Chemical Engineering*, 2002, vol. 26, no. 6, pp. 875-887. doi:10.1016/S0098-1354(02)00013-3
20. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. Hierarchy of Processing Equipment Configuration Design Problems for Multiproduct Chemical Plants, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 3, pp. 410-419. doi:10.1134/S1064230714030046
21. Niu J.J., Wang J.N. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes, *Solid State Sciences*, 2008, vol. 10, no. 9, pp. 1189-1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016
22. Frackowiak E., Delpeux S., Jurewicz K., Szostak K., Cazorla-Amoros D., Beguin F. Enhanced Capacitance of Carbon Nanotubes through Chemical Activation, *Chemical Physics Letters*, 2002, vol. 361, no. 1, pp. 35-41. doi: 10.1016/S0009-2614(02)00684-X

23. Lopez-Arevalo I., Banares-Alcantara R., Aldea A., Rodriguez-Martinez A. A Hierarchical Approach for the Redesign of Chemical Processes, *Knowledge and Information Systems*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 169-201. doi: 10.1007/s10115-006-0060-4

24. Zhou Y.M. Designing for Complexity: Using Divisions and Hierarchy to Manage Complex Tasks, *Organization Science*, 2012, vol. 24, no. 2, pp. 339-355. doi: 10.1287/orsc.1120.0744

25. Popova A.A. [Hardware and technological design for the production of activated carbon material], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 318-327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327 (In Russ., abstract in Eng.)

Структурелес и иерархическес Schema дес Verfahrens zur Aktivierung дес Kohlenstoffmaterials bei Hochtemperatur

Zusammenfassung: Es ist der Prozess der Hochtemperaturaktivierung von Kohlenstoffmaterial betrachtet. Basierend auf dem funktional-hierarchischen Ansatz ist ein Strukturdiagramm des Zusammenspiels von Anlagen und Stoffströmen entwickelt, das die Technologie zur Herstellung hochporöser Kohlenstoffmaterialien umsetzt. Es sind die Besonderheiten des Aufbaus technologischer Anlagen aufgezeigt, die es ermöglichen, das Problem der Verbesserung bestehender Anlagen und der Entwicklung neuer Anlagen unter Berücksichtigung der Besonderheiten laufender Prozesse zu lösen. Dadurch ist die Möglichkeit geschaffen, die Produktivität, Effizienz und Sicherheit der Umsetzung dieses Prozesses, die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie und des daraus resultierenden aktivierten hochporösen Kohlenstoffmaterials zu steigern, sowie den Übergang von der Laborforschung zu seiner industriellen Umsetzung zu beschleunigen.

Schéma structurel et hiérarchique du processus d'activation à haute température du matériau de carbone

Résumé: Est examiné le processus d'activation à haute température du matériau de carbone. A la base d'une approche fonctionnelle et hiérarchique, est élaboré un schéma structurel de l'interaction entre l'équipement et les courants matériels, mettant en œuvre la technologie de la production des matières carbonées hautement poreuses. Sont montrées les caractéristiques de la disposition de l'équipement technologique, permettant de résoudre le problème de l'amélioration de l'existant et le développement de nouveaux, en tenant compte des particularités des processus en cours. Donc, il est possible d'améliorer la productivité, l'efficacité et la sécurité de la mise en œuvre du processus, la compétitivité de la technologie et du matériau à haute teneur en carbone activé par faisceau, ainsi que le passage à partir de la recherche en laboratoire à sa mise en œuvre industrielle.

Авторы: *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Попова Алёна Алексеевна* – кандидат технических наук, специалист по корпоративной социальной ответственности департамента по корпоративным коммуникациям АО «ПРОГРЕСС», Липецк, Россия.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМИКРОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ОТ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

С. И. Котенев✉

*Кафедра «Механика и инженерная графика», mig@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: кинетические характеристики; мембрана; очистка; технологические растворы; электромембранный аппарат.

Аннотация: Рассмотрена возможность применения электромембранного разделения при очистке технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ. В целях изучения влияния параметров проведения процесса разделения на основные кинетические характеристики проведены экспериментальные исследования удельной производительности и коэффициента задержания мембран МФФК-2Г, ММК 0,45 и МФФК-0 при очистке технологических вод от тринатрийфосфата и триполифосфата натрия. Предложены к использованию критериальные зависимости расчета массопереноса при электромембранной очистке технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ. Разработано математическое описание кинетики массопереноса при электромембранной очистке, используемое в методике расчета электромембранного аппарата для удаления синтетических поверхностно-активных веществ из технологических растворов. Предложено технологическое оформление процесса электромембранной очистки технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ.

Введение

Отечественные предприятия ежедневно используют воду в объеме 8...10 млн м³, и в результате образуются сточные воды, содержащие токсичные загрязняющие вещества, одними из которых являются синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ). Современные требования к сбросу промышленных сточных вод обуславливают поиск и разработку более эффективных решений в области их очистки [1, 2]. Наиболее рациональный путь для достижения таких целей – создание локальной системы очистки с возможностью извлечения ценных компонентов и использования очищенных вод в оборотном цикле [3 – 5].

Наибольший успех в отношении эффективности и технологичности очистки сточных вод достигнут при использовании методов мембранного разделения, в частности, обратного осмоса, ультрафильтрации и электромембранных процессов [6 – 11]. Для расчета процесса электромембранного разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам и характеристикам процесса. Одними из основных параметров, характеризующих эффективность

процесса при электромембранном разделении, являются выходная удельная производительность и коэффициент задержания мембраны [6].

Цель работы – исследование кинетических характеристик электромикро-фильтрационной очистки растворов от синтетических поверхностно-активных веществ.

Результаты экспериментальных исследований

В целях исследования основных параметров электромембранного разделения проведен эксперимент по очистке модельных растворов, имитирующих реальные сточные воды с промышленных объектов г. Тамбова, содержащих тринатрийфосфат и триполифосфат натрия. Основные характеристики модельных растворов приведены в табл. 1.

В эксперименте использовали лабораторную электромембранную установку, рабочей частью которой служит плоско-камерная ячейка. При изучении кинетических характеристик процесса электромембранного разделения применялись отечественные мембраны МФФК-2Г, ММК 0,45 и МФФК-0, промышленно выпускаемые ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир). При выборе мембран учитывалось наиболее оптимальное соотношение удельной производительности и задерживающей способности, обеспечивающее требования к качеству пермеата.

Методика проведения подробно представлены в работе [12].

Коэффициент задержания мембраны *K* и выходной удельный поток растворителя *J* находятся в определенной зависимости от материала мембран, природы растворенных веществ и их концентраций в исходном растворе, а также от давления, при котором происходит процесс разделения, и плотности тока [13 – 18].

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные по влиянию этих параметров на величину *K* при электромембранном разделении водных растворов тринатрийфосфата и триполифосфата натрия представлены на рис. 1 – 3. Из приведенных данных следует, что при увеличении выходного удельного потока растворителя через мембрану коэффициент задержания снижается для всех представленных зависимостей. Это явление объясняется тем, что перенос растворенного вещества через мембрану обусловлен в основном конвективным потоком растворителя.

Анализ зависимости удельного потока от концентрации показал, что удельный поток через исследуемые мембраны незначительно уменьшается с ростом концентрации для всех веществ. По значениям концентраций исследуемых растворов их можно отнести к разбавленным. Для таких растворов характерно незначительное влияние роста концентрации на проницаемость мембран. В зависимости от типа мембран отмечается большая удельная производительность мембраны МФФК-2Г, чем ММК 0,45 и МФФК-0.

Коэффициент задержания также находится в линейной зависимости от плотности тока, однако отмечается различное поведение кривых коэффициента задержания для прикатодных и прианодных мембран. Данное явление вызвано «блокировкой» пор прикатодных мембран за счет отвода основной группы ионов [18].

Таблица 1

Основные характеристики модельных растворов

Вещество	Химическая формула	Концентрация, кг/м ³	Температура, °С
----------	--------------------	---------------------------------	-----------------

Тринатрийфосфат	Na_3PO_4	0,5...2,2	5...20
Триполифосфат натрия	$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$	0,3...2,0	

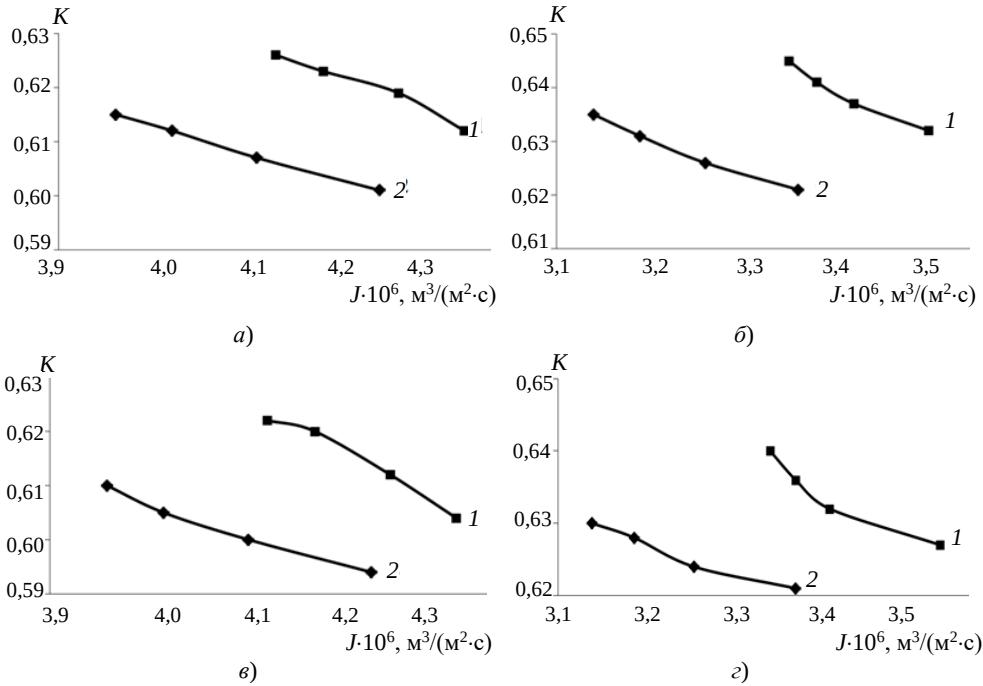
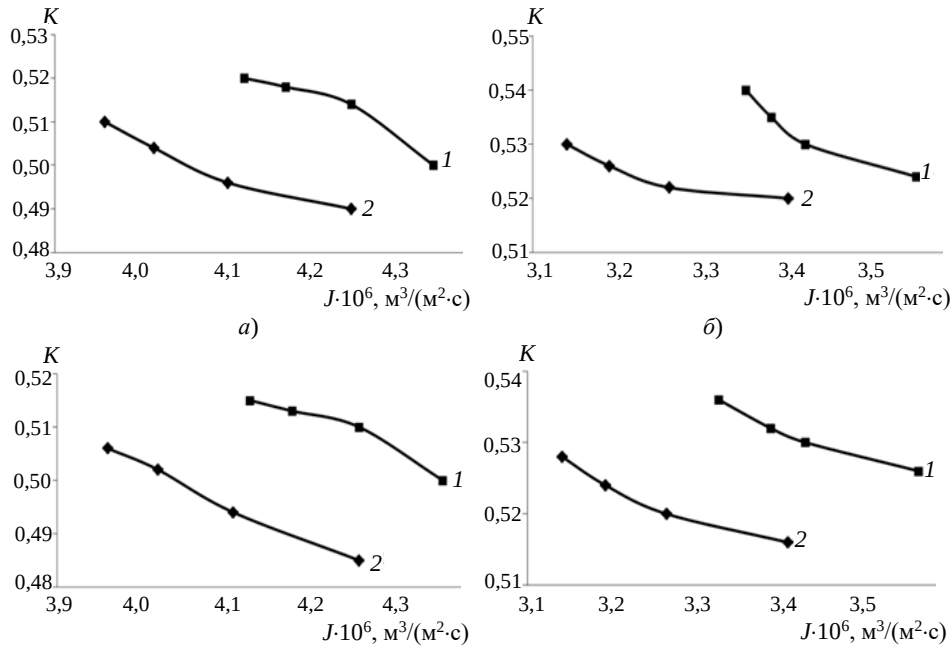


Рис. 1. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя прикатодной (а, в) и прианодной (б, г) мембраны МФК-0 для растворов тринатрийфосфата (а, б) и триполифосфата натрия (в, г):
а, б – $c_{\text{исх}} = 0,5 \text{ кг/м}^3$ (1) и $2,0 \text{ кг/м}^3$ (2); в, г – $c_{\text{исх}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ (1) и $1,5 \text{ кг/м}^3$ (2)



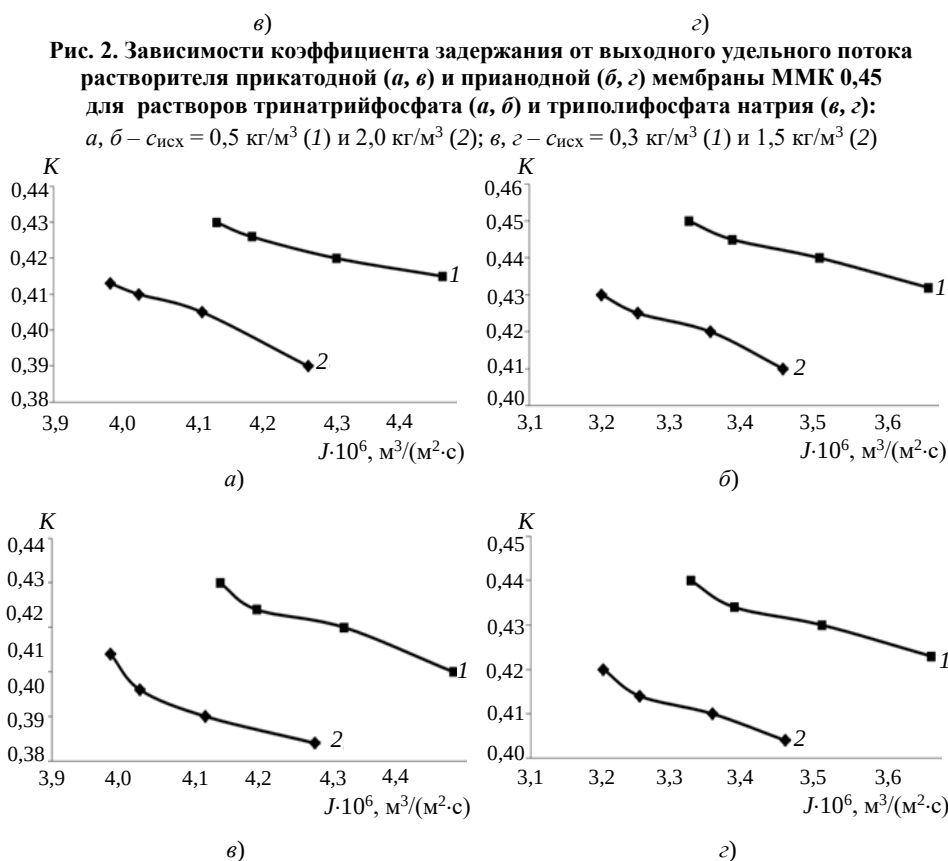


Рис. 3. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока
растворителя прикатодной (а, в) и прианодной (б, з) мембраны МФК-2Г
для растворов тринатрийфосфата (а, б) и триполифосфата натрия (в, з):
а, б – $c_{\text{исх}} = 0,5 \text{ кг/м}^3$ (1) и $2,0 \text{ кг/м}^3$ (2); в, з – $c_{\text{исх}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ (1) и $1,5 \text{ кг/м}^3$ (2)

Для теоретического расчета коэффициента задержания K с наложением электрического тока применялось выражение [18, 19]

$$K = 1 - \left\{ 1 + \left(\frac{1}{k_1 k_p} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{k_2 J}{D} \right) \right] \exp(-k_3 J) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 – эмпирические коэффициенты (табл. 2); i – плотность тока, А/м^2 ; η – выход по току, %; k_p – коэффициент распределения мембран; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; J – удельная производительность, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение.

Для математического описания и физического объяснения явления переноса при электромембранном разделении, а также методик расчета применяются различные подходы, основанные, преимущественно, на уравнениях переноса растворенного вещества и растворителя через мембрану [19, 20].

При расчете и проектировании электромембранных процессов целесообразно знать основные параметры разделения. Параметры для процесса разделения: коэффициент задержания K ; V – объем в емкости исходного раствора, м^3 ;

C – концентрация растворенного вещества в емкости исходного раствора, кг/м³, J_f, J_k, J_p – расходы исследуемого раствора, ретентата и пермеата соответственно, кг/с; C_f, C_k, C_p – концентрации растворенных веществ в исследуемом растворе, ретентате и пермеате соответственно, кг/м³, τ – продолжительность проведения электромембранного процесса, с.

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (1)

Раствор	Мембрана*	k_1	k_2	k_3
Тринатрийфосфат	МФФК-0 (п/а)	0,06	1,0	259 423
	МФФК-0 (п/к)	0,05		252 150
	ММК 0,45 (п/а)	0,06		259 423
	ММК 0,45 (п/к)	0,10		90 709
	МФФК-2Г (п/а)	0,05		93 537
	МФФК-2Г (п/к)	0,10		90 709
Триполифосфат натрия	МФФК-0 (п/а)	0,07	0,9	256 621
	МФФК-0 (п/к)	0,06	1,0	259 423
	ММК 0,45 (п/а)	0,05		252 150
	ММК 0,45 (п/к)	0,06		259 423
	МФФК-2Г (п/а)	0,08		93 537
	МФФК-2Г (п/к)	0,10		90 709
* Мембрана прианодная (п/а) и прикатодная (п/к).				

Рассмотрим задачу массопереноса при электромембранном разделении раствора в мембранном канале.

Исходные условия:

$$V(\tau = 0) = V_0; \tag{2}$$

$$C_f(\tau = 0) = Cf_0. \tag{3}$$

Материальный баланс:

– по растворителю в промежуточной емкости:

$$dV = -J_f d\tau + J_k d\tau; \tag{4}$$

$$dV/d\tau = -J_f + J_k; \tag{5}$$

– растворенному веществу в промежуточной емкости

$$d(Vc_f) = -J_f c_f d\tau + J_k c_k d\tau; \tag{6}$$

– расход мембранного модуля по растворителю

$$J_f = J_k + J_p + J_{осм}; \tag{7}$$

– мембранного модуля по растворенному веществу

$$c_f dV + V dc_f = -J_f c_f d\tau + J_p c_p d\tau - J_{м} c_{м}. \tag{8}$$

После несложных математических преобразований получим следующее выражение для определения концентрации веществ в исследуемом растворе

$$C_f = C_{f0} \exp\left(\frac{k(\Delta P - tRTKC_0)F_m R \tau}{V}\right), \quad (9)$$

где k – числовой коэффициент; ΔP – разность давлений; t – изоклонический коэффициент; R – универсальная газовая постоянная; T – температура 293,15 К; C_0 – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м³; F_m – площадь мембраны, м².

Адекватность математического описания оценивали путем сравнения расчетных значений концентраций растворенного вещества в ретентате $C_{\text{рет}}$ и исходном растворе $C_{\text{исх}}$ с экспериментальными данными, полученными при электро-мембранном разделении растворов тринатрийфосфата и триполифосфата натрия для мембран МФФК-0 и ММК 0,45 (рис. 4, 5).

Сопоставление показало, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 15 %. На основе проведенных исследований по электро-мембранному разделению водных растворов предложено модернизировать схему очистки технологических и сточных вод от СПАВ и фосфатосодержащих веществ.

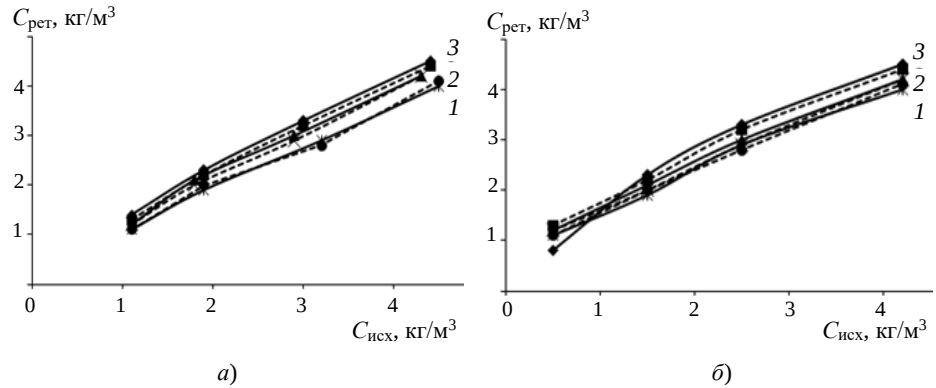
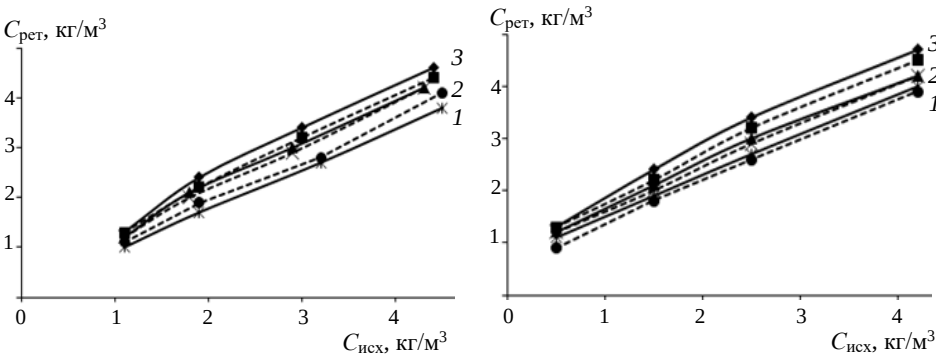


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных концентрационных зависимостей от давления для мембраны МФФК-0 при температуре $T = 293$ К для раствора тринатрийфосфата (а) и триполифосфата (б) P , МПа: 1 – 0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,20 (сплошные линии – эксперимент, штриховые – расчет)



а)

б)

Рис. 5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных концентрационных зависимостей от давления для мембраны ММК-0,45 при температуре $T = 293\text{ K}$ для раствора тринатрийфосфата (а) и триполифосфата (б) P , МПа:
 1 – 0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,20 (сплошные линии – эксперимент, штриховые – расчет)

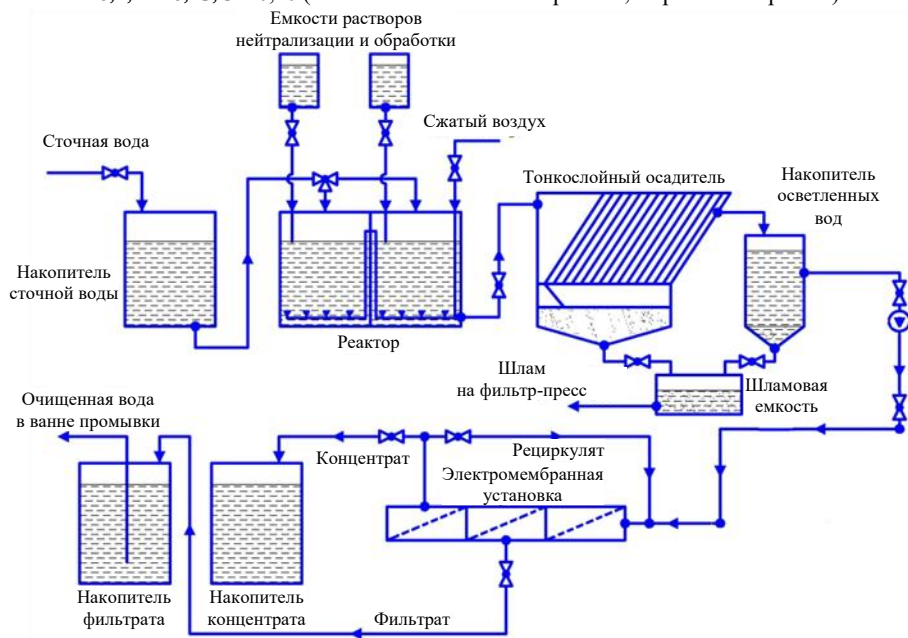


Рис. 6. Схема очистки технологических и сточных вод от СПАВ и фосфатосодержащих веществ

На рисунке 6 представлена комбинированная схема очистки технологических и сточных вод от СПАВ и фосфатосодержащих веществ. Схема предусматривает первоначальную нейтрализацию сточных вод с последующим удалением гидроокисей и дальнейшую электромембранную очистку осветленных вод от ПАВ и фосфатосодержащих веществ. Такая комбинация методов очистки позволяет получать до 80 – 85 % очищенной воды для повторного применения.

Схема работает следующим образом. Технологическая вода со станции промывки поступает в накопитель, откуда подается в реактор для нейтрализации в зависимости от величины значения pH очищаемого раствора. После нейтрализации раствор подается в тонкослойный осадитель. Шлам с осадителя подается на фильтр-пресс и выводится с технологической линии для утилизации. Осветленная вода после осадителя нагнетается насосом-дозатором высокого давления в электромембранную установку, где происходит разделение раствора на фильтрат (пермеат) и концентрат (ретентат). Под действием трансмембранного давления и разности электрических потенциалов протекает процесс задержания ионов растворенных веществ и проникание растворителя. Концентрат подается в накопитель и далее для нового цикла очистки. Очищенная вода (пермеат) подается в накопитель и далее возвращается обратно на станцию помывки.

Заключение

На основании проведенных исследований получены и интерпретированы экспериментальные данные по коэффициенту задержания и выходному удельному потоку растворителя технологических растворов в зависимости от концентрации

разделяемого раствора, трансмембранного давления и плотности тока. Выявлены аппроксимационные зависимости и вычислены значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета коэффициента задержания электромикрофильтрационного процесса разделения технологических растворов в зависимости от физико-химической природы мембраны, концентрации, трансмембранного давления и плотности тока. Представленные критериальные зависимости могут быть использованы при прогнозировании и разработке лабораторных, пилотных и промышленных электрохимических мембранных аппаратов и установок. Разработанное математическое описание позволяет получать концентрации растворенных веществ на выходе из электромембранного аппарата при заданных параметрах процесса разделения. Модернизировано технологическое оформление процесса электромикрофильтрационной очистки технологических растворов от СПАВ и фосфатосодержащих веществ.

Работа выполнена в рамках проведения исследования по государственному заданию, проект № FEMU-2024-0011.

Список литературы

1. Gogina, E. Information Technologies in View of Complex Solution of Waste Water Problems / E. Gogina, N. Makisha // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 587 – 589. – P. 636 – 639. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.636
2. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России / В. В. Сажия, А. Б. Полковников, И. Селдинас [и др.] // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2009. – Т. 23, № 12(105). – С. 94 – 108.
3. Колесников, В. А. Очистка сточных вод на металлургических предприятиях / В. А. Колесников, В. И. Ильин, А. А. Кучеров // *Экология производства*. – 2010. – № 3. – С. 56 – 59.
4. Колесников, В. А. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / В. А. Колесников, С. О. Вараксин, Д. В. Павлов // *Чистая вода: Проблемы и решения*. – 2010. – № 2-3. – С. 50 – 59.
5. Пути решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов / Е. А. Комягин, В. Н. Мынин, И. Ф. Ляпин [и др.] // *Экология и промышленность России*. – 2008. – № 11. – С. 21 – 23.
6. Paidar, M. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Ierspective / M. Paidar, V. N. Fateev, K. Bouzek // *Electrochimica Acta*. – 2016. – Vol. 209. – P. 737 – 756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209
7. García-Sánchez P. AC Electroosmosis: Basics and Lab-on-a-Chip Applications / P. García-Sánchez, A. Ramos // In book: *Encyclopedia of Nanotechnology*. – 2012. – P. 25 – 30. doi: 10.1007/978-90-481-9751-4_125
8. Tanaka Y. Ion Exchange Membranes: Fundamentals and Applications / Y. Tanaka. – Elsevier, 2015. – 522 p.
9. Einbindung der Membrantechnik in die Abwasserreinigung mittels Anaerob-technik / A. Borchmann [et al.] // *Statusseminar Membrantechnik-10 : Hannoversche Industrieabwasser Tagung (HIT)*. – Hannover, 2007. – Heft 139.
10. Tanninen, J. Nanofiltration of Concentrated Acidic Copper Sulphate Solutions / J. Tanninen, M. Mänttari, M. Nyström // *Desalination*. – 2006. – Vol. 189, No. 1-3. – P. 92 – 96. doi: 10.1016/j.desal.2005.06.017
11. Su, X. Electrosorption / X. Su, T. A. Hatton // *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. – 2016. – P. 1 – 11. doi: 10.1002/0471238961.1401141522010904.a01.pub2
12. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях / О. А. Абоно-

симов [и др.] / Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641 – 655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655

13. Платэ, Н. А. Мембранные технологии – авангардное направление развития науки и техники XXI века / Н. А. Платэ // Мембраны. Серия : Критические технологии. – 1999. – № 1. – С. 4 – 13.

14. Дубяга, В. П. Нанотехнологии и мембраны (обзор) / В. П. Дубяга, И. Б. Бесфамильный // Мембраны. Серия : Критические технологии. – 2005. – № 3. – С. 11 – 16.

15. Лазарев, К. С. Исследования кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения растворов на мембранах МГА-95, МГА-100 и ОПМ-К / К. С. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 726 – 734.

16. Лазарев, С. И. Теоретические и прикладные основы электробаромембранных методов разделения многокомпонентных растворов : учеб. пособие / С. И. Лазарев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – 104 с.

17. Шапошник, В. А. История мембранной электрохимии / В. А. Шапошник // Электрохимия. – 2002. – Т. 38, № 8. – С. 900 – 905.

18. Акулинчев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Ca, Fe / А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.120-128

19. Хорохорина, И. В. Кинетика и структурные характеристики мембран электроультрафильтрационной очистки промышленных растворов от анионных поверхностно-активных веществ : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / И. В. Хорохорина. – Тамбов, 2014. – 130 с.

20. Математическое описание массопереноса и гидродинамики потоков раствора в обратноосмотических полупроницаемых мембранах / О. А. Абоносимов, В. И. Кочетов, А. С. Горбачев, А. М. Акулинчев // Вестник Дагестанского гос. ун-та. – 2012. – №. 1. – С. 75 – 78.

Kinetic Characteristics of Electromicrofiltration Purification of Technological Solutions from Synthetic Surfactants

S. I. Kotenev✉

*Department of Mechanics and Engineering Graphics, mig@tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: kinetic characteristics; membrane; technological solutions; cleaning; electric membrane apparatus.

Abstract: The possibility of using electromembrane separation in the purification of process solutions from synthetic surfactants is considered. In order to study the influence of the parameters of the separation process on the main kinetic characteristics, experimental studies were carried out on the specific productivity and retention coefficient of MPFC-2G, MMK 0.45 and MPFC-0 membranes when purifying process waters from trisodium phosphate and sodium tripolyphosphate. Criterion dependencies for calculating mass transfer during electromembrane purification of process solutions from synthetic surfactants have been proposed for use. A mathematical description of the kinetics of mass transfer during electromembrane cleaning has been developed, which is used in the methodology for calculating an electric membrane apparatus for removing synthetic surfactants from process solutions. A technological design for the process of electromembrane purification of technological solutions from synthetic surfactants is proposed.

References

1. Gogina E., Makisha N. Information Technologies in View of Complex Solution of Waste Water Problems, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 587-589, pp. 636-639. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.636
2. Sazhin V.B., Polovnikov A.B., Seldinas I., Belousov A.S., Seldinas O., Tarasenko T.A., Sazhin V.V., Matushkina Ye.V., Sazhina M.B., Batalov Ye.G., Tikhonov A.V. [Problems of ecology and environmental management in the context of the economic development of Russia], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Successes in Chemistry and Chemical Technology], 2009, vol. 23, no. 12 (105), pp. 94-108. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Kucherov A.A. [Wastewater treatment at metallurgical enterprises], *Ekologiya proizvodstva* [Ecology of production], 2010, no. 3, pp. 56-59. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kolesnikov V.A., Varaksin S.O., Pavlov D.V. [Sewage treatment of various industries with the use of the best available technologies], *Chistaya voda: problemy i resheniya* [Pure water: problems and solutions], 2010, no. 2-3, pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Komyagin Ye.A., Mynin V.N., Lyapin I.F., Averina Yu.M., Lopatyuk Yu.Yu., Terpugov G.V., Terpugov D.G. [Ways of solving the problem of wastewater treatment from heavy and radioactive metals], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 11, pp. 21-23. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Paidar M., Fateev V.N., Bouzek K. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Perspective, *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 209, pp. 737-756.
7. Garcia-Sanchez P., Ramos A. AC Electroosmosis: Basics and Lab-on-a-Chip Applications, *Encyclopedia of Nanotechnology*, 2012, pp. 25-30.
8. Tanaka Y. *Ion Exchange Membranes: Fundamentals and Applications*, Elsevier Science, 2015, 522 p.
9. Borchmann A., Rosenwinkel K.H., Gubanov L.N., Katraeva I.V. Einbindung der Membrantechnik in die Abwasserreinigung mittels Anaerobtechnik, Statusseminar Membrantechnik-10: Hannoversche Industrieabwasser Tagung (HIT), Hannover, 2007, Heft 139.
10. Tanninen J., Mänttari M., Nyström M. Nanofiltration of concentrated acidic copper sulphate solutions, *Desalination*, 2006, vol. 189, no. 1-3, pp. 92-96. doi: 10.1016/j.desal.2005.06.017
11. Su X., Hatton T.A. Electrosorption, *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 2016, pp. 1-11. doi: 10.1002/0471238961.1401141522010904.a01.pub2
12. Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependencies and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater in enterprises], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655, doi: 10.17277/vestnik.2017.04. pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Plate N.A. [Membrane technologies - the avant-garde direction of development of science and technology of the XXI century], *Membrany. Seriya: Kriticheskie tekhnologii* [Membrane. Series: Critical Technology], 1999, no. 1, pp. 4-13. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Dubyaga V.P., Besfamil'nyi I.B. [Nanotechnology and membrane (review)], *Membrany. Seriya: Kriticheskie tekhnologii* [Membrane. Series: Critical Technology], 2005, no. 3, pp. 11-16. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Lazarev K.S., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A. [Investigations of the kinetic coefficients of reverse osmotic separation of solutions on MGA-95, MGA-100 and OPM-K membranes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 726-734. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Lazarev S.I. *Teoreticheskie i prikladnye osnovy elektrobaromembrannykh metodov razdeleniya mnogokomponentnykh rastvorov: uchebnoe posobie* [Theoretical and applied bases elektrobaromembrannykh methods for separating multicomponent solutions: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2008, 104 p. (In Russ.)

17. Shaposhnik V.A. [History of membrane electrochemistry], *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 2002, vol. 38, no. 8, pp. 900-905. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Akulinchev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Investigation of Electrobaromembrane Separation of Industrial Process Solutions Containing Heavy Metal Ions Pb, Cd, Fe], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128, doi: 10.17277/vestnik.2017.01. pp.120-128 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Khorokhorina I.V. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2014, 130 p. (In Russ.)

20. Abonosimov O.A., Kochetov V.I., Gorbachev A.S., Akulinchev A.M. [Mathematical description of mass transfer and hydrodynamics of solution flows in reverse osmosis semi-permeable membranes], *Vestnik Dagestanskogo gos. un-ta* [Bulletin of the Dagestan State University], 2012, no. 1, pp. 75-78. (In Russ., abstract in Eng.)

Kinetische Eigenschaften der Elektromikrofiltration der Reinigung technologischer Lösungen von synthetischen Tensiden

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit der Anwendung der Elektromembranentrennung bei der Reinigung der technologischen Lösungen von synthetischen oberflächenaktiven Stoffen untersucht. Um den Einfluss der Parameter des Trennprozesses auf die wichtigsten kinetischen Eigenschaften zu untersuchen, sind experimentelle Studien der spezifischen Produktivität und des Retentionskoeffizienten von MFFK-2G, MMK 0,45 und MFFK-0 Membranen bei der Reinigung des Prozesswassers von Trinatriumphosphat und Natriumtripolyphosphat durchgeführt. Kriterienabhängigkeiten der Stofftransportberechnung bei der Elektromembranreinigung von technologischen Lösungen aus synthetischen Tensiden sind zur Anwendung angeboten. Die mathematische Beschreibung der Stoffübergangskinetik bei der Elektromembranreinigung, die in der Berechnungsmethode der Elektromembranapparatur zur Entfernung von synthetischen Tensiden aus technologischen Lösungen verwendet wird, ist entwickelt. Es ist ein technologischer Entwurf des Prozesses der Elektromembranreinigung der technologischen Lösungen von synthetischen Tensiden vorgeschlagen.

Caractéristiques cinétiques de la purification électromicrofiltre des solutions technologiques à partir des tensioactifs synthétiques

Résumé: Est examinée la possibilité d'utiliser la séparation électromembranaire dans le nettoyage des solutions de traitement à partir des substances synthétiques surfaciques-actives. Afin d'étudier l'influence des paramètres du processus de séparation sur les principales caractéristiques cinétiques, sont réalisées des études expérimentales sur la performance spécifique et le taux de rétention des membranes MFFK-2G, MMK 0,45 et MFFK-0 dans le traitement des eaux technologiques à partir de phosphate trisodique et de tripolyphosphate de sodium. Est proposé d'utiliser les dépendances de critères du calcul du transfert de masse dans le nettoyage électronique des solutions technologiques à partir de substances synthétiques actives. Est élaborée une description mathématique de la cinétique de transfert de masse dans le nettoyage électromembranaire, utilisée dans la méthode de calcul de l'appareil électromembranaire pour éliminer les substances synthétiques sur-actives des solutions technologiques. Est

proposée la conception techno-logique du processus de nettoyage électromembranaire des solutions technologiques à partir de tensioactifs synthétiques.

Автор: *Котенев Сергей Игоревич* – ассистент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОМАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

М. А. Промтов✉, В. Г. Желудков, Н. Ц. Гатапова, А. Ю. Степанов

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», promptov.ma@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: водомазутная эмульсия; вязкость эмульсии; концентрация ванадия; плотность эмульсии; размер частиц эмульсии; роторный импульсный аппарат; содержание серы.

Аннотация: Рассмотрено влияние концентрации воды в водомазутной эмульсии (ВМЭ), полученной в роторном импульсном аппарате, на ее физико-химические характеристики. Установлено, что средний диаметр частиц эмульсии увеличивается при увеличении доли воды в мазуте. С увеличением содержания воды в мазуте растет плотность ВМЭ, так как плотность воды больше плотности мазута. Увеличение содержания диспергированной воды в мазуте также приводит к увеличению вязкости. Вязкость ВМЭ, содержащей 30 % воды, в два раза выше вязкости исходного необработанного судового мазута. Температура вспышки ВМЭ повышается по мере увеличения концентрации воды в топливе. При концентрации воды в эмульсии более 10 % вспышка отсутствует. Концентрация серы уменьшается в 1,7 раза, содержание ванадия снижается более чем в 2,7 раза при увеличении доли воды в ВМЭ до 30 %

Введение

Водотопливные эмульсии (ВТЭ) многие десятки лет рассматриваются как альтернативный вид топлива для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), работающих на дизельном топливе или мазуте, котлов для получения горячей воды или пара и других нагревательных устройств [1, 2]. Интерес к применению ВТЭ возрастает в последнее время, так как их использование позволяет улучшить не только энергетические, но и экологические характеристики ДВС и котлоагрегатов: увеличить полноту сгорания топлива, снизить образование вредных веществ при их сжигании [3 – 5], повысить пожаробезопасные свойства топлива, утилизировать загрязненные воды, улучшить товарные свойства обводненных топлив, снизить нагарообразование в двигателях и топках котлоагрегатов [6], а также уменьшить расход топлива [7 – 10]. Несмотря на положительные свойства ВТЭ пока не получили широкого применения из-за их существенных недостатков: расслоения при хранении, необходимости в дополнительных поверхностно-активных веществах (ПАВ) для стабилизации и повышения дисперсности топливной эмульсии, необходимости в модернизации и усложнения систем подачи топлива двигателей и котлоагрегатов, коррозии металлических деталей.

Среди ВТЭ наиболее перспективны водомазутные эмульсии (ВМЭ), так как мазуты в своем составе содержат природные ПАВ, которые хорошо стабилизируют ВМЭ, что позволяет хранить эмульсию длительное время [11]. Обводненные

мазуты, которые часто разогревают «острым паром», можно в дальнейшем использовать как товарное топливо без дополнительных операций по удалению воды, приготовив из них ВМЭ. Кроме того, загрязненную нефтепродуктами воду можно диспергировать в мазуте и получить стабильную ВМЭ.

Теоретическая часть

Важными характеристиками мазутных топлив считаются вязкость и плотность. Вязкость ВМЭ не является аддитивным свойством, то есть не равна сумме вязкостей мазута и воды [12, 13]. Для ВМЭ с концентрацией воды менее 50 % с для расчета динамической вязкости часто применяют формулу Эйнштейна [13]

$$\mu_{\Sigma} = (1 + 2,5V)\mu_m, \quad (1)$$

где μ_m – динамическая вязкость мазута при заданной температуре, Па·с; V – массовая доля воды в эмульсии.

Существуют также другие расчетные методики для определения вязкости нефтяной эмульсии [12], но с увеличением доли воды их точность снижается.

Для расчета плотности ВМЭ применяют формулу в соответствии с правилом аддитивности [13]

$$\rho_{\Sigma} = \rho_m(1 - V) + \rho_v V, \quad (2)$$

где ρ_{Σ} , ρ_m , ρ_v – плотности эмульсии, мазута и воды соответственно, кг/м³.

Важной характеристикой ВМЭ является дисперсность – степень раздробленности дисперсной фазы в дисперсионной среде. От дисперсности зависят многие другие свойства эмульсий. Мерой дисперсности является удельная площадь межфазной поверхности капель воды – отношение суммарной площади поверхности капель к их общему объему, м²/м³:

$$S_{уд} = S/V.$$

В первом приближении дисперсность считают приблизительно равной обратной величине среднеарифметического диаметра капель $S_{уд} = 1/d_{ср}$.

Вязкость возрастает с повышением дисперсности эмульсии, но до определенного уровня (0,1 – 0,8 мкм), то есть до состояния микроэмульсии. Таким образом, вязкость ВМЭ также зависит от технологии ее получения [13].

Повышение сернистости мазута выше 0,3 % приводит к усиленной низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева ДВС и котлоагрегатов. Содержание серы в мазуте выше 1 – 1,5 % мало сказывается на коррозионной активности продуктов сгорания [13]. Присутствие серы в мазуте ухудшает работу линий подачи мазута, мазутных насосов и подогревателей. Более серьезные проблемы при сжигании сернистого мазута возникают в окружающей среде при выбросе соединений SO_x.

Содержание ванадия в мазуте, как правило, не превышает 0,03 %. При сжигании мазута ванадий переходит в соответствующие оксиды, которые в свою очередь взаимодействуют с оксидами других элементов. В этом процессе образуются сложные соединения, формирующие агрессивные отложения на поверхностях нагрева ДВС и котлоагрегатов, под слоем которых проходит коррозия металла [13].

Экспериментальная часть

Для получения ВМЭ использовали мазут, близкий по фактическим параметрам к судовому топливу IFO-180. Судовые топлива IFO (*англ.* Intermediate Fuel Oil) производятся из остаточных и среднестиллятных нефтепродуктов. Показатели судовых топлив регламентируются ГОСТ Р 54299–2010.

Роторные импульсные аппараты (РИА) широко применяются для приготовления тонкодисперсных эмульсий. Они обеспечивают высокоэффективное перемешивание компонентов эмульсий в непрерывном потоке при небольшом эффективном объеме. Одним из достоинств данного типа оборудования является возможность разрушения межмолекулярных и агрегатных связей в сложных структурных единицах и парафиновой сетке мазута из высокопарафинистой нефти за счет механического, гидродинамического и акустического видов воздействия [14].

Приготовление ВМЭ на основе судового мазута с добавлением воды осуществляли методом циклического перемешивания. Технологическая схема установки на базе РИА представлена на рис. 1. Установка включает в себя РИА-150, шестеренный насос, емкость для эмульсии, приборы для измерения расхода, давления и температуры. Вращение валов насоса, РИА регулировалось частотными преобразователями. Обработка осуществлялась перекачиванием эмульсии из емкости насосом под давлением в РИА и обратно в емкость.

Для получения ВМЭ использовалась следующая методика. Подогретое до температуры 60 °С судовое мазутное топливо заливалось в емкость установки. Мазутное топливо прокачивалось через гидравлическую систему установки под давлением

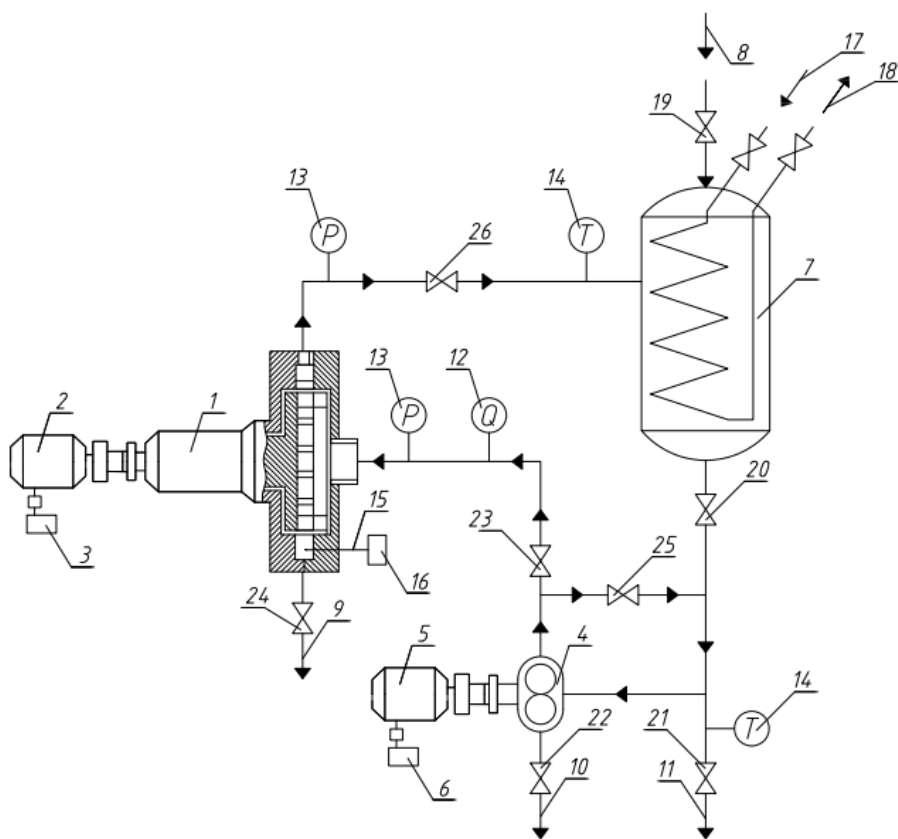


Рис. 1. Технологическая схема установки РИА-150:

- 1 – РИА; 2 – электродвигатель РИА; 3, 6 – частотные преобразователи;
- 4 – шестеренчатый насос; 5 – электродвигатель насоса; 7 – емкость для нефти;
- 8, 9 – патрубки залива жидкости и отбора проб соответственно; 10, 11 – сливные патрубки;
- 12 – счетчик жидкости; 13 – манометры; 14 – датчики температуры; 15 – гидрофон;
- 16 – кавитометр; 17, 18 – патрубки подвода и отвода теплоносителя соответственно;
- 19 – 26 – шаровые краны

около 0,1 МПа и нагревало гидравлическую систему агрегата до 70 °С. После прогрева установки разогретый мазут выгружался из нее и загружалась новая порция судового мазута, предварительно нагретого до 60 °С, которая также прокачивалась по замкнутому гидравлическому контуру. Затем заданное количество воды медленно заливалось в емкость, чтобы равномерно распределить ее по объему мазута при работающем шестеренчатом насосе с малой подачей и работающим на частоте вращения около 60 об/мин роторе РИА.

Гидравлические параметры определялись при заданной частоте вращения вала электродвигателя насоса, чтобы обеспечить контролируемую подачу жидкости. Основные контролируемые параметры – давление, измеренное на входном патрубке РИА, температура, измеренная на выходном патрубке РИА. Поскольку используемая гидравлическая система закольцована и жидкость перекачивалась по замкнутому контуру, на выходном патрубке РИА давление отсутствовало.

Чтобы обеспечить равномерное распределение грубодисперсной ВМЭ по гидравлической системе, проводили пятикратное циклическое перемешивание в гидравлической системе установки. При обработке эмульсии ротор РИА вращался с частотой 3300 об/мин. Скорость сдвига в зазоре между ротором и статором составляла $26 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ при средней величине зазора между ротором и статором ~0,1 мм. Расход через РИА – 2,2 м³/ч, давление на входе в аппарат – 0,9 МПа. Эмульсия обрабатывалась при 10 циклах прохождения через РИА. Средняя температура мазута и воды до обработки в РИА составляла 60 °С, средняя температура ВМЭ после 10 кратного прохождения через РИА – 66...70 °С.

Для исследований приготовили пять образцов ВМЭ в соотношении вода:судовой мазут, кг/кг:

- 1) 5 % ВМЭ – 0,5 : 9,5;
- 2) 10 % ВМЭ – 1,0 : 9,0;
- 3) 15 % ВМЭ – 1,5 : 8,5;
- 4) 20 % ВМЭ – 2,0 : 8,0;
- 5) 30 % ВМЭ – 3,0 : 7,0.

После обработки определяли основные характеристики образцов полученной ВМЭ с разными концентрациями воды, а также характеристики исходного мазута. Параметры плотности и вязкости мазута и ВМЭ представлены в табл. 1. Параметры воды принимались по ГОСТ 21727–76 для температуры 20 °С. При других температурах вязкость и плотность воды определялись по справочным таблицам; плотность мазута при температурах более 15 °С – по рекомендациям МИ 2092-90. Масса мазута в цистернах железнодорожного маршрута. Методика выполнения измерений объемно-массовым методом. Плотность ВМЭ определялась в соответствии с правилом аддитивности (2).

Динамическая вязкость мазута и ВМЭ определялась расчетным методом на основании данных по измерению кинематической вязкости и плотности; расчетная динамическая вязкость ВМЭ – по формуле Эйнштейна (1).

Важным параметром, характеризующим ВМЭ, является размер частиц [15]. После обработки в установке каплю ВМЭ наносили на предметное стекло и затем фотографировали с помощью микроскопа МБ-30 и цифрового фотоаппарата. Определение размеров частиц эмульсии осуществляли с помощью объектомикрометра ОМ-П. Для получения достоверных данных в каждой пробе оценивался диаметр не менее 1000 частиц.

В качестве величины, характеризующей размер частиц ВМЭ, использовали среднеарифметический диаметр сферических частиц воды в мазуте

$$d_{\text{ср}} = \sum_{i=1} d_i n_i / \sum_{i=1} n_i ,$$

где d_i – диаметр i -й частицы в пробе, мкм; n_i – число частиц во фракции с диаметром d_i .

Таблица 1

Измеренные и расчетные параметры исходного мазута, воды и ВМЭ

Физические параметры		Мазут		Вода		Водомазутная эмульсия с содержанием воды, %												
		измер.	табл.	5		10		15		20		30						
				измер.	расч.	измер.	расч.	Δ, %	измер.	расч.	Δ, %	измер.	расч.	Δ, %				
Массовая доля воды, %		0,25	100	5,1	5	2	8,7	10	13	8,7	15	42	15,3	20	23	20,6	30	31
Температура вспышки в закрытом тигле, °С		95	—	104	—	отс.	—	—	отс.	—	отс.	—	отс.	—	отс.	—	—	
		1		3														4
Среднеарифметический диаметр частиц, мкм		—																
Вязкость кинематическая, мм²/с																		
50 °С		100,2	0,658	104,5		97,4				115,3			111,4			276,2		
80 °С		28,4	0,365	29,3		27,8		—		31,5		—	30,7		—	60,3		—
100 °С		15,3	0,294	15,7		15				16,7			16,3			28,7		
Плотность, кг/м³																		
15 °С		964,9	999,1	967,9	966,7	0,1	969,9	968,3	0	969,5	970,0	0	975,0	971,7	0,2	976,2	983,8	
50 °С		946,8	988,0	946,1	948,9		948,1	950,9	0,1	947,1	950,6		953,1	955,0	0,1	954,1	965,3	0,2
80 °С		926,6	971,8	928,0	928,2	0	930,0	931,1	0	929,0	933,4	0,1	935,1	935,8	0	936,1	926,6	
100 °С		913,1	958,36	915,3	915,4		918,3	917,6	0	917,3	919,9		923,3	922,2	0	924,3	928,0	
Вязкость динамическая, мПа·с																		
50 °С		94,87	0,547	98,94	111,3	11	92,35	115,44	20	109,2	150,15	27	106,18	152,3	30	263,52	461,2	
80 °С		26,315	0,355	27,19	30,56	11	25,854	32,3	20	29,264	40,76	28	28,708	43,07	33	56,446	98,8	43
100 °С		13,97	0,282	14,37	16,17	12	13,775	17,2	21	15,319	21,07	27	14,994	22,5	33	26,527	46,43	

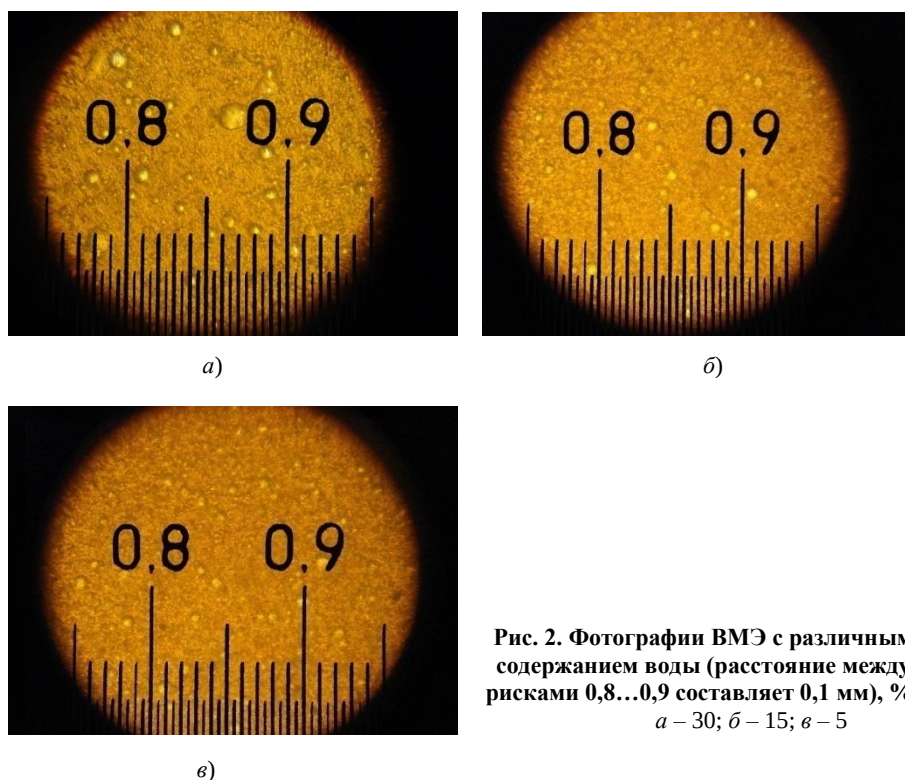


Рис. 2. Фотографии ВМЭ с различным содержанием воды (расстояние между рисками 0,8...0,9 составляет 0,1 мм), %:
a – 30; б – 15; в – 5

Типичные фотографии образцов ВМЭ показаны на рис. 2. С повышением концентрации воды в эмульсии средний размер частиц увеличивался. Средний размер частиц воды после 10-кратного прохождения через РИА составил: для 5%-й ВМЭ – 1,2 мкм, 15%-й ВМЭ – 4,4 мкм, 30%-й ВМЭ – 7,3 мкм,.

Обсуждение результатов и выводы

Измеренные и расчетные параметры исходного мазута, воды и ВМЭ представлены в табл. 1.

Средний размер частиц эмульсии увеличивается при увеличении концентрации воды в мазуте. Увеличение размеров частиц воды способствует их коагуляции и снижает стабильность ВМЭ. Увеличение среднего размера частиц воды с 1,2 мкм в 5 % ВМЭ до 7,3 мкм в 30 % ВМЭ не является критичным, так как эмульсии со средним размером частиц до 10 мкм достаточно стабильны. Размер капель воды в эмульсии по разному влияет на содержание вредных выбросов при сжигании ВМЭ. Так, эффективность снижения выбросов NO_x растет с увеличением размера капель, а выбросы SO_x и CO_x снижаются при уменьшении размера частиц воды в ВМЭ [9, 11, 15, 16].

С увеличением доли воды в мазуте растет плотность ВМЭ, так как плотность воды больше плотности мазута. Расчетные и измеренные значения плотности практически совпадают, их разность лежит в пределах погрешности измерения. Плотность эмульсии увеличивается с возрастанием доли воды в ВМЭ, что согласуется с данными в работе [5].

Увеличение доли диспергированной воды в мазуте также приводит к увеличению расчетной динамической вязкости в соответствии с формулой Эйнштейна (1). Необходимо отметить, что разница между полученными на основе измерений и расчетными по формуле (1) значениями динамической вязкости ВМЭ увеличивается при увеличении доли воды (до 43 %).

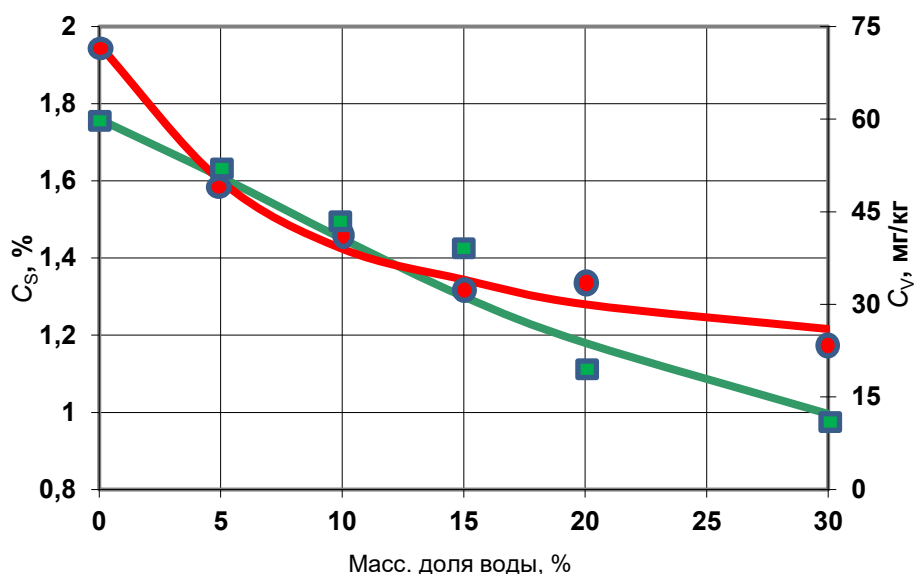


Рис. 3. Зависимости концентрации серы и ванадия от массовой доли воды ВМЭ:
■ – серы, %; ● – ванадия, мг/кг

Исследования по подбору методик расчета вязкости нефтяных эмульсий пока не определили однозначный подход для расчета их вязкости [12].

Одним из показателей пожароопасных свойств топлива является температура вспышки – температура разогрева топлива, при которой пары воспламеняются при приближении к ним источника открытого пламени. Она определяется фракционным составом и зависит от температур кипения и испарения топлива.

Анализ образцов показал, что температура вспышки ВМЭ повышается по мере увеличения доли воды в мазуте. При содержании воды в ВМЭ более 10 % вспышка отсутствует. Это закономерное явление, так как при нагревании в закрытом тигле вода переходит в пар и выше 100 °С пары воды препятствуют образованию горючей смеси паров углеводородных веществ с воздухом. Вероятно, 10 % воды в ВМЭ дает достаточную массу водяного пара в закрытом тигле при нагреве выше 100 °С, чтобы создать негорючую смесь паров.

Концентрации серы и ванадия снизились при увеличении доли воды в ВМЭ (рис. 3). Концентрация ванадия уменьшилась более чем в 2,7 раза, серы – более чем в 1,7 раза. Возможно, эти химические элементы образовывали соединения, которые не определяли при анализе. Водомазутная эмульсия с низким содержанием серы при сжигании обеспечит низкие выбросы SO_x . Также коррозионные свойства ВМЭ становятся более слабыми при уменьшении содержания в топливе серы и ванадия. Температурная коррозия при низком содержании ванадия в топливе также должна быть снижена [5, 13].

Список литературы

1. Корницкий, С. Я. О сжигании обводненных мазутов / С. Я. Корницкий // Известия ВТИ им. Дзержинского. – М., 1935. – № 10. – С. 172 – 176.
2. Иванов, В. М. Топливные эмульсии / В. М. Иванов. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 216 с.

3. Патров, Ф. В. Снижение концентраций оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей при использовании водотопливных эмульсий / Ф. В. Патров, О. С. Вахромеев // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 141 – 146.
4. Корниенко, Д. А. Анализ методов снижения содержания вредных веществ в отработанных газах судовых дизелей / Д. А. Корниенко, В. А. Туркин // Вестник гос. морского ун-та имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. – 2016. – № 3. – С. 55 – 58.
5. The Potential of a Water-in-Diesel Emulsion for Increased Engine Performance / N. H. Abdurahman, Y. M. Rosli, N. H. Azhari, A. Abdul Adam // MATEC Web of Conferences. – 2016, 70.01003. – 5 p. doi : 10.1051/matecconf/20167001003.
6. Secondary Atomization of Fuel Oil and Fuel Oil / Water Collisions and Impingement on a Solid Wall / A. Islamova, P. Tkachenko, N. Shlegel, G. Kuznetsov // Energies. – 2023. – No. 16. – P. 1008. – URL : <https://doi.org/10.3390/en16021008>
7. Current Trends in Water-in-Diesel Emulsion as a Fuel / M. Y. Khan, Z. A. Abdul Karim, F. Y. Hagos, A. Rashid A. Aziz, I. M. Tan // The Scientific World Journal. – 2014, Article ID 527472. – 15 p. – URL : <http://dx.doi.org/10.1155/2014/527472>
8. Water-In-Oil Emulsion as Boiler Fuel for Reduced NO_x Emissions and Improved Energy Saving / C. Y. Hsuan, S. S. Hou, Y. L. Wang, T. H. Lin // Energies. – 2019. – No. 12. – P. 1002. doi :10.3390/en12061002
9. Water is an Effective Additive to Fuel Oil to Reduce the Concentration of Soot in the Gas Phase / D. Sambaeva, M. Moldobaev, K. Kemelov, Z. Maimekov // MANAS Journal of Engineering. – 2022. – Vol. 10(2). – P. 145 – 150. doi : 10.51354/mjen.1142079
10. Hussany, F. L. Study of a Feeding System for Electric Power Plants Using Alternative Fuels (Energy Emulsions) / F. L. Hussany, D. J. Jasim // Journal of Engineering Research. – 2023. – No. 11. – P. 219 – 226. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100069>
11. Water/Heavy Fuel Oil Emulsion Production, Characterization and Combustion / M. Alaa, S. Soulayman, T. Abdelkarim, Z. Walid // Int. Journal of Renewable Energy Development. – 2021. – Vol. 10, No. 3. – P. 597 – 605. doi : 10.14710/ijred.2021.34873
12. Шестаков, Р. А. Анализ реологических свойств водонефтяных-эмульсий / Р. А. Шестаков, А. А. Дульченко // Neftegaz.RU. – 2022. – № 12, декабрь. – URL : <https://magazine.neftegaz.ru/articles/transportirovka/764898-analiz-reologicheskikh-svoystv-vodoneftyanykh-emulsiy/>
13. Белосельский, Б. С. Подготовка и сжигание высокоподогретых мазутов на электростанциях и в промышленных котельных / Б. С. Белосельский, Б. Ф. Глухов. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 72 с.
14. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2015. – 148 с.
15. Niszczota, P. Study of the Droplet Size of the Discrete Phase of a Fuel-Water Emulsion / P. Niszczota, M. Gieras // Journal of KONBiN. – 2023. – Vol. 53, No. 4. doi : 10.5604/01.3001.0054.1751
16. Samoilenko, D. Improving the Performance of Diesel Engines Fueled with Water-Fuel Emulsion / D. Samoilenko, A. Savchenko, S. Kravchenko // Combustion Engines. – 2023. – Vol. 194, No. 3. – P. 116 – 122. – URL : <https://doi.org/10.19206/CE-169139>

Characteristics of a Water-Oil Emulsion Obtained in a Rotor-Stator Device

M. A. Promptov✉, V. G. Zheludkov, N. Ts. Gatapova, A. Yu. Stepanov

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
promptov.ma@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: water-oil emulsion; emulsion viscosity; vanadium concentration; emulsion density; emulsion particle size; rotor-stator device; sulfur content.

Abstract: The paper considers the influence of water concentration in a water-oil emulsion (WOE) prepared in a rotor-stator device on its physicochemical characteristics. It has been established that the average particle diameter of the emulsion increases with increasing proportion of water in the fuel oil. With increasing water content in oil, the density of WOE increases, since the density of water is greater than the density of oil. An increase in the content of dispersed water in fuel oil also leads to an increase in viscosity. The viscosity of WOE containing 30 % water is two times higher than the viscosity of the original untreated marine fuel oil. The flash point of WOE increases as the concentration of water in the fuel increases. When the water concentration in the emulsion is more than 10 %, there is no flash. The sulfur concentration decreased by 1.7 times, the vanadium content decreased by more than 2.7 times with an increase in the proportion of water in the WOE up to 30 %.

References

1. Kornitskiy S.Ya. [On the burning of watered fuel oil], *O szhiganii obvodnennykh mazutov Izvestiya VTI im. Dzerzhinski* [News of VTI named after Dzerzhinsky], 1935, no. 10, pp. 172-176. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ivanov V.M. *Toplivnye Emulsii* [Fuel emulsions], Moscow: Izdatelstvo AN SSSR, 1962, 216 p. (In Russ.)
3. Patrov F.V., Vakhromeev O.S. [The reduction of nitrogen oxide concentration in exhaust gases of ship diesel engines applying oil-to-water emulsions], *Snizhenie koncentracij oksidov azota v otrabotavshih gazah sudovykh dizelej pri ispol'zovanii vodotoplivnykh emul'sij, Vestnik AGTU. Ser. Moorskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the ASTU. Ser.: Marine engineering and Technology], 2010, no. 1, pp. 141-146. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kornienko D.A., Turkin V.A. [Analysis of methods for reducing the content of harmful substances in the exhaust gases of marine diesel engines], *Ekspluatatsiya, bezopasnost i ekonomika vodnogo transporta* [Operation, safety and economics of water transport], 2016, no. 3, pp. 55-58. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Abdurahman N.H., Rosli Y.M., Azhari N.H., A. Abdul Adam. The Potential of a Water-in-Diesel Emulsion for Increased Engine Performance. *MATEC Web of Conferences*. 2016, 70.01003, 5 p. doi: 10.1051/mateconf/20167001003. (In Russ.)
6. Islamova A., Tkachenko P., Shlegel N., Kuznetsov G. Secondary Atomization of Fuel Oil and Fuel Oil/Water Collisions and Impingement on a Solid Wall. *Energies*. 2023, 16, 1008. URL: <https://doi.org/10.3390/en16021008> (In Russ.)
7. Khan M.Y., Abdul Karim Z.A., Hagos F.Y., Rashid A., Aziz A., Tan I.M. Current Trends in Water-in-Diesel Emulsion as a Fuel. *The Scientific World Journal*. 2014, Article ID 527472, 15 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/527472> (In Russ.)

8. Hsuan C. Y., Hou S. S., Wang Y.L., Lin T.H. Water-In-Oil Emulsion as Boiler Fuel for Reduced NO_x Emissions and Improved Energy Saving. *Energies*. 2019, 12, 1002. doi:10.3390/en12061002 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Sambaeva D., Moldobaev M., Kemelov K., Maimekov Z. Water is an effective additive to fuel oil to reduce the concentration of soot in the gas phase. *MANAS Journal of Engineering*. 2022, vol. 10(2), pp. 145-150. doi: 10.51354/mjen.1142079 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Hussany F. L., Hussany F. L., Jasim D. J. Study of a feeding system for electric power plants using alternative fuels (energy emulsions). *Journal of Engineering Research*. 2023, 11, pp. 219-226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100069> (In Russ., abstract in Eng.)
11. Alaa M., Soulayman S., Abdelkarim T., Walid Z. Water/heavy fuel oil emulsion production, characterization and combustion. *Int. Journal of Renewable Energy Development*. 2021, 10(3), pp. 597-605. doi: 10.14710/ijred.2021.34873 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Shestakov R. A., Dulchenko A. A. Analysis of the rheological properties of water-oil emulsions. *Neftegaz.RU*, 2022, no. 12, Desember. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/transportirovka/764898-analiz-reologicheskikh-svoystv-vodoneftnyanykh-emulsiy/> (In Russ., abstract in Eng.)
13. Belosel'ski B.S., Gluhov B.F. *Podgotovka i szhiganie vysokopodogretykh mazutov na elektrostanciyakh i v promyshlennykh kotel'nykh* [Preparation and combustion of highly heated fuel oil in power plants and industrial boilers]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1993, 72 p. (In Russ.)
14. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods of calculating the characteristics of a rotor-stator device], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2015, 148 p. (In Russ.)
15. Niszczota P., Gieras M. Study of the droplet size of the discrete phase of a fuel-water emulsion. *Journal of KONBiN*. 2023, vol. 53, no. 4. doi: 10.5604/01.3001.0054.1751 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Samoilenko D., Savchenko A., Kravchenko S. Improving the performance of diesel engines fueled with water-fuel emulsion. *Combustion Engines*, 2023, vol. 194, no. 3, pp. 116-122. URL: <https://doi.org/10.19206/CE-169139> (In Russ., abstract in Eng.)

Eigenschaften der in einem rotierenden Impulsapparat hergestellten Wasser-Öl-Emulsion

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss der Wasserkonzentration in einer Wasser-Heizöl-Emulsion (WME), die in einem Rotationsimpulsgerät erhalten wird, auf deren physikalisch-chemischen Eigenschaften betrachtet. Es ist festgestellt, dass die durchschnittliche Partikelgröße der Emulsionspartikel mit zunehmendem Wasseranteil im Heizöl zunimmt. Mit steigendem Wassergehalt im Heizöl nimmt die Dichte von VME zu, da die Dichte von Wasser größer ist als die Dichte von Heizöl. Die Erhöhung des Gehalts an dispergiertem Wasser im Heizöl führt auch zur Erhöhung der Viskosität. Die Viskosität von VME mit 30 % Wasser ist doppelt so hoch wie die Viskosität des ursprünglichen unbehandelten Schiffskraftstofföls. Der Flammpunkt von VME steigt mit zunehmender Wasserkonzentration im Kraftstoff. Wenn die Wasserkonzentration in der Emulsion mehr als 10 % beträgt, kommt es zu keinem Flash. Die Schwefelkonzentration nahm um das 1,7-fache ab, der Vanadiumgehalt sank um mehr als das 2,7-fache mit zunehmendem Wasseranteil im VME bis zu 30 %.

Caractéristiques de l'émulsion eau-mazout obtenue dans un appareil à impulsions rotatives

Résumé: Est examiné l'effet de la concentration d'eau dans l'émulsion de lubrifiant à base d'eau (ELE) obtenue dans un appareil à impulsions rotatives sur ses caractéristiques physico-chimiques. Est constaté que la diamètre moyenne des particules de l'émulsion augmente avec l'augmentation de la proportion d'eau dans le mazout. Avec l'augmentation de la teneur en eau dans le mazout, la densité de VM augmente, car la densité de l'eau est supérieure à celle du mazout. L'augmentation de la teneur en eau dispersée dans le mazout entraîne également une augmentation de la viscosité. La viscosité de l'ELE contenant 30 % d'eau est deux fois supérieure à celle du mazout marin brut d'origine. Le point d'éclair de l'ELE augmente à mesure que la concentration d'eau dans le carburant augmente. Lorsque la concentration d'eau dans l'émulsion est supérieure à 10 %, il n'y a pas d'éclair. La concentration de soufre a diminué de 1,7 fois, la teneur en vanadium a diminué de plus de 2,7 fois avec une augmentation de la proportion d'eau dans l'ELE jusqu'à 30 %.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Желудков Владимир Геннадьевич* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», *Степанов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ДЕФОРМАЦИЯ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ В УСЛОВИЯХ ВНЕЗАПНО ПРИЛОЖЕННОЙ К НЕМУ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ

Л. Г. Карьев^{1✉}, В. А. Федоров²

*Кафедры: профильной довузовской подготовки (1), karyev@list.ru;
теоретической и экспериментальной физики (2),
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»,
Тамбов, Россия*

Ключевые слова: деформация; линейная плотность; перемещение; периодичность; сила; стержень; тригонометрический ряд; упругость; функция.

Аннотация: Проведено теоретическое исследование деформации упругого стержня, движущегося под действием внезапно приложенной продольной силы. Получена явная функция зависимости абсолютной деформации стержня от времени $\Delta l(t)$, не содержащая тригонометрических рядов; выявлен характер его деформации в процессе движения. Дана практическая рекомендация, основанная на результатах работы.

Введение

Современный этап развития науки и техники характеризуется быстрым совершенствованием технических параметров изделий, интенсификацией рабочих процессов, повышением надежности и ресурса машин и механизмов. Происходит быстрая смена конструкционных материалов, внедряются новые технологические процессы. Прогнозирование поведения материала в различных физических условиях – одна из главных задач материаловедения, сопротивления материалов и теории упругости.

В условиях внешних воздействий в механических системах и деталях механизмов может возникать установившееся стационарное напряженное состояние [1, 2]. В этом аспекте, например в работе [3], проведено теоретическое исследование поведения поперечных плоскостей в упругом стержне в условиях действия на него объемных сил – инерции и силы тяжести, получена функция $y(x)$ зависимости линейной плотности поперечных плоскостей стержня от координаты x .

Периодический характер работы большинства машин и механизмов предопределяет периодичность нагружения и деформирования, как отдельных их звеньев, так и тех конструкций, которые служат опорами или фундаментами. Механические колебания сопутствуют, практически, работе каждой машины. В одних случаях они вредны, в других – приносят пользу и целенаправленно применяются в современной технике. Большинство современных технических сооружений, приборов, инструментов, механизмов представляют собой сложные системы, в основе которых колебательные конструкции, скомпонованные из стержневых и тонкостенных элементов, изготовленные из материалов, которые

в пределах достаточно малых деформаций могут рассматриваться как упругие. При различных воздействиях на данные конструкции, например удар или внезапное приложение силы, в них могут возникать свободные и вынужденные колебания различного характера [1, 2]. Знание частоты и характера колебаний деталей, являющихся элементами колебательных конструкций, является теоретической основой изготовления таких механизмов, которые будут надежны в эксплуатации и долговечны.

Цель работы – теоретическое исследование поведения упругого стержня, в условиях внезапно приложенной постоянной силы, направленной вдоль его оси, установление функциональной зависимости его абсолютной деформации в зависимости от времени $\Delta l(t)$ (не содержащей бесконечных сумм) и характера этой деформации в процессе движения стержня.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим покоящийся стержень постоянного поперечного сечения цилиндрической формы, концы которого не закреплены. Материал стержня однородный и подчиняется закону Гука. Направим ось X по оси стержня. Пусть на правый торец стержня внезапно начинает действовать постоянная сила F , равномерно распределенная по поверхности торца стержня и направленная вдоль оси X (рис. 1).

Функция продольных перемещений поперечных плоскостей стержня $u(x, t)$ в данных условиях удовлетворяет дифференциальному уравнению [4, 5]

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{F \delta(x-l)}{\rho s},$$

при этом начальные условия

$$u(x, 0) = \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0,$$

граничные условия

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} = 0,$$

где ρ – плотность вещества стержня, кг/м³; s – площадь поперечного сечения, м²; l – длина недеформированного стержня, м; c – скорость звука в стержне, м/с; $t \geq 0$ – текущее от начала воздействия силы время, с; x – координата точки на оси стержня; $\delta(x-l)$ – дельта-функция.

Искомая функция $u(x, t)$ выражается тригонометрическим рядом [4, 5]

$$u(x, t) = \frac{Ft^2}{2\rho sl} + \frac{2Fl}{\rho sc^2 \pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} \cos\left(\frac{m\pi x}{l}\right) \left(1 - \cos\frac{m\pi t}{l}\right). \quad (1)$$

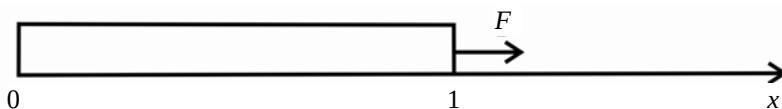


Рис. 1. Упругий стержень, движущийся в условиях внезапно приложенной силы, направленной вдоль его оси

Плоскость стержня с координатой $x = 0$ (левый торец стержня) к моменту времени t будет иметь координату $u(0, t)$, правый торец стержня ($x = l$) к моменту времени t переместится в точку с координатой $l + u(l, t)$. Очевидно,

$$u(l, t) - u(0, t) = \Delta l(t).$$

С учетом формулы (1),

$$\Delta l(t) = \chi \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} (1 - \cos \beta m t) (\cos m \pi - 1),$$

где $\chi = \frac{2Fl}{\rho s c^2 \pi^2}$, $\beta = \frac{c\pi}{l}$. Учитывая, что при $m = 2, 4, 6, 8, \dots$ $\cos m \pi = 1$, получаем

$$2\chi \left[\left(1 + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \dots \right) - \left(\cos \beta t + \frac{\cos 3\beta t}{3^2} + \frac{\cos 5\beta t}{5^2} + \frac{\cos 7\beta t}{7^2} + \dots \right) \right] = \Delta l(t).$$

В компактной форме

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\beta t}{(2n-1)^2} = \frac{\Delta l(t)}{2\chi}. \quad (2)$$

Чтобы упростить приведенное выражение, рассмотрим суммы слева:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8};$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\beta t}{(2n-1)^2} = -\frac{\pi}{4}\beta t + \frac{\pi^2}{8}, \quad \beta t \in [0; \pi].$$

Сумма последнего ряда является 2π -периодической и четной функцией [6], следовательно, может быть представлена непрерывной функцией, состоящей из линейных функций по аргументу t на всей оси t так, что:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\beta t}{(2n-1)^2} = -\frac{\pi}{4}\beta t + \frac{\pi^2}{8}, \quad t \in \left[0; \frac{\pi}{\beta} \right];$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\beta t}{(2n-1)^2} = \frac{\pi}{4}\beta t - \frac{3\pi^2}{8}, \quad t \in \left[\frac{\pi}{\beta}; \frac{2\pi}{\beta} \right];$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\beta t}{(2n-1)^2} = -\frac{\pi}{4}\beta t + \frac{5\pi^2}{8}, \quad t \in \left[\frac{2\pi}{\beta}; \frac{3\pi}{\beta} \right];$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\beta t}{(2n-1)^2} = (-1)^k \frac{\pi}{4}\beta t + (-1)^{k+1} (2k-1) \frac{\pi^2}{8}, \quad t \in \left[\frac{(k-1)\pi}{\beta}; \frac{k\pi}{\beta} \right], \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots$$

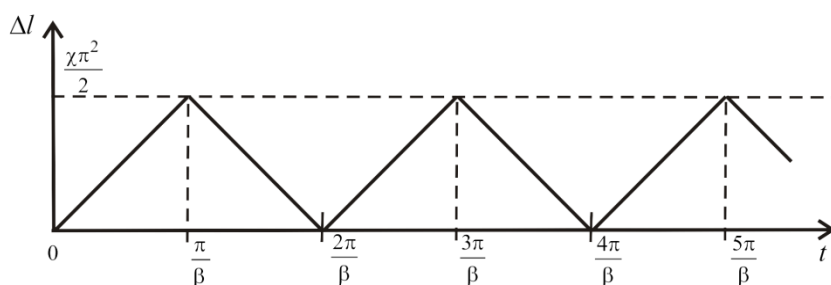


Рис. 2. График функции $\Delta l(t)$

По смыслу задачи рассматриваем $t \geq 0$. С учетом вышесказанного из уравнения (2) получаем

$$\Delta l(t) = (-1)^{k+1} \frac{\chi \pi^2}{2} t + \frac{\chi \pi^2}{4} \left[1 + (-1)^{k+2} (2k-1) \right]. \quad (3)$$

Графиком функции (3) является ломаная непрерывная кривая, состоящая из фрагментов линейных функций относительно времени t (рис. 2). Абсолютная деформация стержня изменяется по линейному закону.

Максимальное удлинение стержня (с учетом, что $c = \sqrt{E/\rho}$)

$$\Delta l_{\max} = \frac{\chi \pi^2}{2} = \frac{Fl}{sE},$$

где E – модуль Юнга материала стержня, Па.

Очевидно, период изменения длины стержня

$$T = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2l}{c},$$

частота

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{2l}.$$

Раскрывая введенные выше сокращенные обозначения в функции (3), получим

$$\Delta l(t) = (-1)^{k+1} \frac{Ft}{s\sqrt{\rho E}} + \frac{Fl}{2sE} \left[1 + (-1)^{k+2} (2k-1) \right]. \quad (4)$$

То есть в процессе движения стержня в условиях действия на него внезапно приложенной постоянной силы F не произойдет установления некоторой постоянной абсолютной деформации стержня – длина стержня будет периодически линейно изменяться, а точное ее значение $l(t)$ можно вычислить по формуле

$$l(t) = l + \Delta l(t).$$

Например, для стали $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $c = 5000$ м/с, если длина стержня $l = 10$ м, диаметр 2 см (то есть площадь поперечного сечения $s = 3,14 \cdot 10^{-4}$ м²), а сила, действующая на стержень $F = 4 \cdot 10^5$ Н, то $\Delta l_{\max} = 6,4 \cdot 10^{-2}$ м, $\nu = 250$ Гц. Максимальная относительная деформация при этом $\epsilon_{\max} = \Delta l_{\max}/l = 6,4 \cdot 10^{-3}$ м. Тогда максимальное нормальное напряжение в стержне будет составлять $\sigma_{\max} = 1280$ МПа, что близко к пределу текучести легированных качественных сталей.

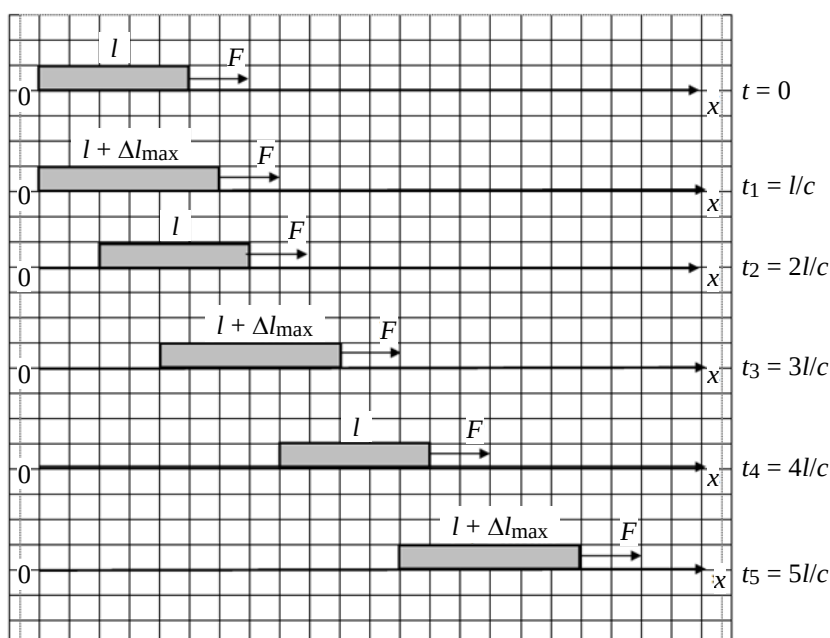


Рис. 3. Поступательное движение стержня и его относительная деформация в условиях действия на него внезапно приложенной постоянной силы
(справа указаны интервалы времени, в течение которых стержень перемещался;
□ – $\Delta l_{\max}$ – масштабность)

На рисунке 3 показано движение стержня за интервалы времени, кратные l/c , в условиях внезапно приложенной к стержню продольной силы. При поступательном движении стержня его длина периодически изменяется на одинаковую величину $\Delta l_{\max}$. В ходе поступательного движения стержень периодически растягивается и сжимается до исходной длины. Очевидно, когда стержень приобретает исходную длину, в процессе своего движения, внутренняя динамика стержня, обусловленная силой инерции в данный момент, эквивалентна его внутренней динамике, соответствующей интервалу времени l/c .

Заключение

Таким образом, упругий стержень, движущийся под действием продольной внезапно приложенной силы, деформируется так, что периодически удлиняется и затем укорачивается до исходного размера, при этом максимальная абсолютная деформация его сохраняется. Величина абсолютной деформации пропорциональна приложенной внешней силе. Получена функция, выражающая зависимость абсолютной деформации стержня от времени (4). Частота изменения длины стержня, в общем случае, лежит в интервале от инфразвуковой до ультразвуковой. Очевидно, периодически изменяющаяся длина стержня может негативно сказаться на работе различных машин и механизмов (при соответствующих условиях), при большой силе, действующей на стержень, может проявляться остаточная деформация в стержневых системах, и это необходимо учитывать. Важно отметить и следующее, если такая стержневая система попадет в зону действия внешней частоты звуковых колебаний, совпадающей с собственной частотой некоторых элементов данной системы, то последние могут разрушиться в результате резонанса.

Список литературы

1. Степин, П. А. Сопротивление материалов : учеб. для немашинистов. спец. вузов / П. А. Степин. – 8-е изд. – М. : Высшая школа, 1988. – 367 с.
2. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – Изд. 3-е, доп. и переработ. – Л. : Машиностроение, 1976. – 320 с.
3. Karyev, L. G. On the Distribution of the Atomic Planes in an Elastic Single-Crystal Bar Under the Action of Volumetric Forces / L. G. Karyev, V. A. Fedorov, A. D. Berezner // Journal of Physics Conference Series. – 2021. – Vol. 2090, No. 1. – P. 012057. doi:10.1088/1742-6596/2090/1/012057
4. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 1985. – 474 с.
5. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1970. – 712 с.
6. Натансон, И. П. Краткий курс высшей математики : учеб. пособие для ВТУЗов / И. П. Натансон. – СПб. : Лань, 2001. – 736 с.

Deformation of an Elastic Rod under Conditions of a Sudden Longitudinal Force Application

L. G. Karyev^{1✉}, V. A. Fedorov²

Department of Profile Pre-University Training (1), karyev@list.ru;

Department of Theoretical and Experimental Physics (2);

Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Keywords: deformation; linear density; moving; periodicity; force; kernel; trigonometric series; elasticity; function.

Abstract: A theoretical study of the deformation of an elastic rod moving under the action of a suddenly applied longitudinal force was carried out. An explicit function of the dependence of the absolute deformation of the rod on time $\Delta l(t)$, which does not contain trigonometric series, is obtained; the nature of its deformation during movement was revealed. A practical recommendation is given based on the research results.

References

1. Stepin P.A. *Soprotivleniye materialov: ucheb. dlya nemashinistov. spets. vuzov* [Strength of materials: textbook. for non-mechanical engineers. specialist. universities], Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 367 p. (In Russ.)
2. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of the applied theory of vibrations and impact], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1976, 320 p. (In Russ.)
3. Karyev L. G., Fedorov V.A., Berezner A.D. On the Distribution of the Atomic Planes in an Elastic Single-Crystal Bar Under the Action of Volumetric Forces, *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 2090, no. 1, pp. 012057. doi:10.1088/1742-6596/2090/1/012057
4. Timoshenko S. P., Yang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Fluctuations in engineering], Moscow: FIZMATLIT, 1985, 474 p. (In Russ.)

5. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Partial differential equations of mathematical physics], Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 712 p. (In Russ.)

6. Natanson I.P. *Kratkiy kurs vysshey matematiki : ucheb. posobiye dlya VTUZov* [Short course in higher mathematics: textbook. manual for technical colleges], St. Petersburg: Lan', 2001, 736 p. (In Russ)

Verformung eines elastischen Stabs unter den Bedingungen plötzlich auf ihn eingesetzter Längskraft

Zusammenfassung: Es ist eine theoretische Untersuchung der Verformung des elastischen Stabes durchgeführt, der sich unter der Einwirkung einer plötzlich aufgebrachten Längskraft bewegt. Eine explizite Funktion der Abhängigkeit der absoluten Verformung des Stabes von der Zeit $\Delta l(t)$, die keine trigonometrischen Reihen enthält, ist erhalten; der Charakter seiner Verformung im Laufe der Bewegung ist festgestellt. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Arbeit ist eine praktische Empfehlung gegeben.

Déformation de la tige élastique sous une force longitudinale subitement appliquée à celle-ci

Résumé: Est réalisée une étude théorique de la déformation d'une tige élastique se déplaçant sous l'action d'une force longitudinale soudainement appliquée. Est obtenue une fonction explicite de la dépendance de la déformation absolue de la tige en fonction du temps, ne contenant pas de séries trigonométriques; est révélée la nature de sa déformation dans le processus de mouvement. Sont données les recommandations pratiques fondées sur les résultats.

Авторы: *Карьев Леонид Геннадьевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры профильной довузовской подготовки; *Федоров Виктор Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ СМЕСЕЙ В РЕЦИРКУЛЯЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ

А. М. Проценко✉

*Кафедра «Технологические комплексы, машины и механизмы»,
nasty12rudchenko8@gmail.com; ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия*

Ключевые слова: винтовые устройства; моделирование; ресурсосбережение; рециклинг; рециркуляционный смеситель комбинированного действия; смешение; техногенные материалы.

Аннотация: Представлены результаты совершенствования конструкций горизонтальных смесителей для композиционных смесей. Предложена интенсификация процесса смешения за счет объемно-пространственного воздействия рабочих органов на композиционную смесь и организации поэтапного процесса получения смесей. Разработана конструкция рециркуляционного смесителя комбинированного действия для приготовления композиционных смесей с техногенными гетерогенными компонентами. Получены аналитические выражения для расчета площадей контакта винтовых устройств с материалом при различных углах их поворота, позволяющие определить моменты сопротивления при перемешивании композиционных масс и потребляемые мощности приводов камер смешения. Исследован процесс приготовления смеси одно- и двухзаходными винтовыми устройствами различного геометрического профиля.

Введение

Вопрос получения качественных композиционных смесей является актуальным, несмотря на постоянное развитие строительной отрасли и модернизацию смешивающего оборудования. Особую значимость данное научно-техническое направление приобретает в связи с необходимостью создания оборудования для приготовления композиционных смесей с различными техногенными компонентами [1, 2]. Кроме того, разработка инновационных технологий с использованием вторичных материальных ресурсов способствует комплексному решению проблемной задачи переработки твердых бытовых отходов [3, 4].

Одним из направлений повышения качества смешивания материалов является конструктивно-технологическое совершенствование рабочих органов. Интенсификация процесса гомогенизации компонентов в смесителе достигается за счет выбора и совершенствования геометрии, формы и схемы расположения рабочих органов, что также влияет на энергозатраты процесса гомогенизации обрабатываемой среды.

Проведенный анализ патентных исследований показал, что в целях повышения надежности и долговечности рабочих органов применяют защитные кожухи для лопастей [5, 6]. Данная модернизация позволяет продлить срок службы лопастных устройств, повышая тем самым производительность и эффективность смесителя.

Для интенсификации процесса гомогенизации используют комбинаторику лопастных устройств. Так, в работах [7, 8] реализуется интенсивное перемещение всех компонентов смеси как в радиальном, так и осевом направлениях внутри камеры. Благодаря повышению «степени свободы» движущихся компонентов смеси, создается турбулизация и интенсификация перемещаемых слоев материала. Выгрузочные лопасти реализуют рециклинг, частично возвращая материал в зону смешения.

Применение рамочных и спиралевидных лопастных устройств [9, 10] позволяет разрезать материал послойно по всему объему камеры, осуществляя макрорасмешивание, а также повышает транспортирующую способность внутри барабана, что устраняет застойные зоны и интенсифицирует процесс смешения. В конструкциях, представленных в [11, 12], используются стержневые элементы в качестве смешивающих устройств. Исполнение таких конструкций («фазрушителей») позволяет воздействовать на смесь, разделяя ее на потоки и образуя завихрения, что увеличивает зону интенсификации процесса смешения, создавая вихревые потоки и разрушая слои материала перед лопастями. Это повышает однородность распределения всех компонентов смеси и улучшает ее качество.

Организация процесса приготовления смеси и введения добавок, реализация постадийного воздействия на материал также интенсифицирует процесс гомогенизации. Так, в патенте [13] реализуется двухстадийный процесс смешения. С помощью автоматизированной системы управления и подачи сигналов о закрытии и открытии загрузочных и разгрузочных затворов и шибера возможно регулирование времени приготовления смеси. Данное техническое решение позволяет увеличить производительность и уменьшить занимаемую площадь на производстве.

По результатам проведенного анализа патентных исследований и конструкций рабочих органов смесителей можно сделать вывод, что объемно-пространственное исполнение рабочих органов интенсифицирует процесс гомогенизации. Однако это требует специальных научно-технических разработок и исследований для установления наиболее рациональной геометрической формы, размеров композиционных схем расположения рабочих органов [14, 15].

Для исследования процесса взаимодействия смешивающего (рециркуляционного) устройства с обрабатываемой средой представим его в виде усеченной пластины, наклоненной к горизонтальной оси под углом α [16]. Угол среза эллипсного контура β образующей AB к малой оси эллипса AB определяет направление силового воздействия на материал: по ходу движения потока материала – β' или в обратном направлении – β'' . При этом изменяются технологические функции устройств (схемы расположения – моделирования) при их расположении (на противоположных сторонах эллипсного контура по его большей оси AB) с различным направлением среза (β') по отношению к малой оси эллипса AB) – транспортирующее воздействие в заданную сторону камеры или при одинаковом направлении среза – рециркулирующее воздействие на материал во внутреннем пространстве между устройствами. Направление и частота вращения вала устройств имеют принципиальное значение, определяющее режим работы камеры смешения.

Таким образом, площадь контакта однозаходного винтового устройства (ОВУ) с материалом зависит от следующих параметров $S_k = f(\pm\alpha; \pm\beta; l; \varphi; R_{ОВУ}; \xi)$.

Для расчета значений $S_{ОВУ}$ используем схему, показанную на рис. 1). Геометрический профиль ОВУ для упрощения расчетов можно представить в виде части эллипсного контура, ограниченного образующей AB , наклоненной под углом β к его малой оси. При этом устройство наклонено к горизонтальной оси камеры смешения под углом α . Расстояние от образующей до горизонтальной оси

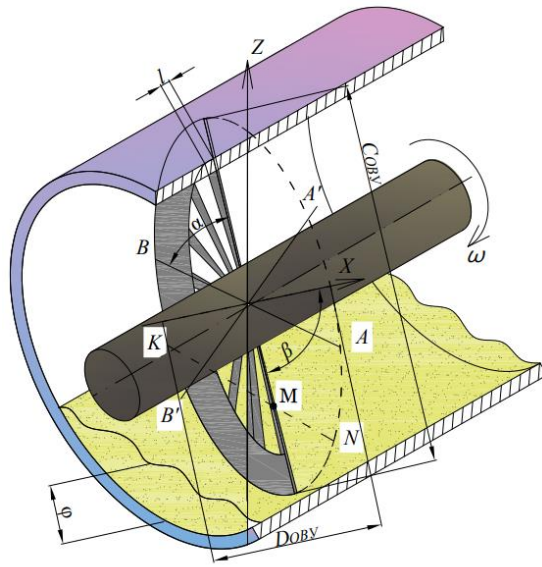


Рис. 1. Схема взаимодействия лопастного смешивающего устройства с материалом

камеры смешения равно l , коэффициент загрузки материалом – φ . Угол поворота устройства обозначим через ξ , диаметр устройства – $D_{\text{ОВУ}}$, радиус – $R_{\text{ОВУ}}$.

Выбор данного геометрического профиля устройства позволяет более детально изучить механизм его воздействия на перемешиваемую среду, ввиду многообразия вышеуказанных параметров [17, 18].

При исходных данных $S_{\text{ОВУ}} = \pi R_{\text{ОВУ}} C_{\text{ОВУ}}$, где $C_{\text{ОВУ}} = R_{\text{ОВУ}} / \sin \alpha$; $S_{\text{ОВУ}} = \pi R_{\text{ОВУ}}^2 / \sin \alpha$.

Для определения значения $S_{\text{ОВУ}}$ воспользуемся интегральным выражением с заданными граничными условиями (1)

$$S_{\text{ОВУ}} = 2 \int_{-R_{\text{ОВУ}}}^{X_A} dx \int_0^Z dz + \int_{X_A}^{X_B} dx \int_{Z_{A,B}}^Z dz. \quad (1)$$

Используем при этом следующие значения Z и $Z_{A,B}$:

$$\begin{cases} Z = \pm \frac{1}{\sin \alpha} R_{\text{ОВУ}}^2 - x^2; \\ Z_{AB} = \text{tg } \beta x + l. \end{cases} \quad (2)$$

После соответствующих преобразований получим значения $S_{\text{ОВУ}}$

$$\begin{aligned} S_{\text{ОВУ}} = & \frac{1}{2 \sin \alpha} \times \\ & \times \left[R_{\text{ОВУ}}^2 \left(\pi + \arcsin \alpha \frac{x_B}{R_{\text{ОВУ}}} + \arcsin \alpha \frac{x_A}{R_{\text{ОВУ}}} \right) + x_A \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_A^2} + x_B \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_B^2} \right] - \\ & - \frac{1}{2} \text{tg } \beta (x_B^2 - x_A^2) - l(x_B - x_A). \end{aligned} \quad (3)$$

При реализации процесса гомогенизации смеси происходит цикличное погружение устройства в слой материала, то есть изменение площади контакта устройства со средой. Согласно схеме площадь контакта с материалом зависит от угла поворота вала ОВУ, $S_k = f(\xi)$. Последовательность погружения ОВУ в материал обозначается графическими точками.

Тогда площадь соприкосновения ОВУ со слоем материала, ограниченную линиями по оси Z краем образующей AB ($Z_{A,B}$) линией соприкосновения NM ($Z_{N,M}$) и эллипсным контуром ($Z_{эл}$), можно выразить из системы:

$$Z_{A,B} = \operatorname{tg} \beta x + l; \quad (4)$$

$$Z = \operatorname{tg} \beta_1 x + l'; \quad (5)$$

$$Z_{эл} = \pm \frac{1}{\sin \alpha} \sqrt{R_{ОВУ}^2 - x^2}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \beta_1 x = \frac{\operatorname{tg} \xi}{\sin \alpha}$; $l' = \frac{L}{\sin \alpha \cos \xi}$.

Координаты точек A , B , K , N и M можно установить, решив следующие уравнения:

$$\begin{cases} X_{A,B} = \frac{-l \sin^2 \alpha \operatorname{tg} \beta \pm \sqrt{R_{ОВУ}^2 (1 + \sin^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta) - l^2 \sin^2 \alpha}}{1 + \sin^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}; \\ Z_{A,B} = \frac{\pm \operatorname{tg} \beta \sqrt{R_{ОВУ}^2 (1 + \sin^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta) - l^2 \sin^2 \alpha}}{1 + \sin^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} X_{N,K} = -L \sin \xi \pm \cos \xi \sqrt{R_{ОВУ}^2 - L^2}; \\ Z_{N,K} = \frac{1}{\sin \alpha} (L \cos \xi \pm \sin \xi \sqrt{R_{ОВУ}^2 - L^2}); \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} X_M = \frac{l - l_1}{\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta} = \frac{l \sin \alpha \cos \xi - L}{\sin \xi - \sin \alpha \operatorname{tg} \beta \cos \xi}; \\ Z_M = \operatorname{tg} \beta_1 \frac{l - l_1}{\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta} + l_1 = \frac{\operatorname{tg} \beta_1 l - \operatorname{tg} \beta_1 l_1}{\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta} = \frac{l \sin \xi - L \operatorname{tg} \beta}{\sin \xi - \sin \alpha \operatorname{tg} \beta \cos \xi}. \end{cases} \quad (9)$$

Исходя из приведенной схемы взаимодействия ОВУ с материалом (см. рис. 1) и соответствующих преобразований, площадь взаимодействия устройства с материалом определяется по формуле

$$S_k = \frac{1}{2 \sin \alpha} \left[R_{ОВУ}^2 \left(\pi + \arcsin \frac{x_C}{R_{ОВУ}} + \arcsin \frac{x_N}{R_{ОВУ}} \right) + x_C \sqrt{R_{ОВУ}^2 - x_K^2} + x_N \sqrt{R_{ОВУ}^2 - x_N^2} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \beta_1 (x_K^2 - x_N^2) - l(x_K - x_N). \quad (10)$$

Используя полученное ранее значение $S_{\text{ОВУ}}$ (3), получим окончательно

$$S_K = \frac{1}{2\sin\alpha} \left[R_{\text{ОВУ}}^2 \left(\pi + \arcsin \frac{x_A}{R_{\text{ОВУ}}} + \arcsin \frac{x_C}{R_{\text{ОВУ}}} \right) + x_A \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_A^2} + x_N \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_K^2} \right] - \frac{1}{2} \text{tg} \beta_1 (x_K^2 - x_M^2) - l_1 (x_K - x_M) + \frac{1}{2} \text{tg} \beta (x_A^2 - x_M^2) + l (x_A - x_M). \quad (11)$$

Аналогично, по выполненным расчетам площади контакта ОВУ с материалом при различных углах поворота ξ устройства, можно определить соответствующие значения $S_{\text{кОВУ}}$ для устройства, наклоненного в сторону выгрузки материала.

Тогда, для схемы расположения ОВУ его площадь, ограниченная образующей AB , будет равна

$$S_{\text{ОВУ}} = \frac{1}{2\sin\alpha} \left[R_{\text{ОВУ}}^2 \left(\pi - \arcsin \frac{x_A}{R_{\text{ОВУ}}} - \arcsin \frac{x_B}{R_{\text{ОВУ}}} \right) - x_A \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_A^2} - x_B \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_B^2} \right] - \frac{1}{2} \text{tg} \beta (x_A^2 - x_B^2) - l(x_A - x_B). \quad (12)$$

На стадии погружения устройства в материал, при пересечении линии контура слоя NK и образующей ОВУ $A'B'$ в точке M' , значение $S_{\text{ОВУ}}$ будет определяться суммой двойных интегралов площадей

$$S_{\text{ОВУ}} = \int_{x_M}^{x_{A'}} dx \int_{x_{A',B'}}^{z_{N,K}} dz + \int_{x_{A'}}^{x_N} dx \int_{z_K}^{z_{N,K}} dz = \frac{1}{2\sin\alpha} \times \left[R_{\text{ОВУ}}^2 \left(\arcsin \frac{x_N}{R_{\text{ОВУ}}} - \arcsin \frac{x_{A'}}{R_{\text{ОВУ}}} \right) + x_N \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_N^2} - x_{A'} \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_{A'}^2} \right] + \frac{1}{2} \text{tg} \beta_1 (x_N^2 - x_M^2) + l_1 (x_N - x_M) - \frac{1}{2} \text{tg} \beta (x_{A'}^2 - x_{M'}^2) - l(x_{A'} - x_{M'}). \quad (13)$$

Максимальное значение площади контакта ОВУ со слоем материала будет достигаться при полном погружении устройства

$$S_{\text{кmax}} = \frac{1}{2\sin\alpha} \left[R_{\text{ОВУ}}^2 \left(\pi - \arcsin \frac{x_N}{R_{\text{ОВУ}}} - \arcsin \frac{x_K}{R_{\text{ОВУ}}} \right) - x_N \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_N^2} - x_K \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_K^2} \right] - \frac{1}{2} \text{tg} \beta_1 (x_K^2 - x_N^2) - l(x_K - x_N). \quad (14)$$

Соответственно, при выходе ОВУ из слоя материала площадь взаимодействия уменьшается

$$S_{\text{квых}} = \int_{x_{B'}}^{x_{M'}} dx \int_{z_{A',B'}}^{z_{\text{эл}}} dz + \int_{x_{M'}}^{x_K} dx \int_{z_{N,K}}^{z_{\text{эл}}} dz = \frac{1}{2\sin\alpha} \times$$

$$\times \left[R_{\text{ОВУ}}^2 \left(\arcsin \frac{x_K}{R_{\text{ОВУ}}} - \arcsin \frac{x_B}{R_{\text{ОВУ}}} \right) + x_K \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_K^2} - x_{B'} \sqrt{R_{\text{ОВУ}}^2 - x_{B'}^2} \right] - \\ - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \beta_1 (x_K^2 - x_{M'}^2) - l(x_K - x_{M'}) - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \beta (x_{M'}^2 - x_{B'}^2) - l(x_{M'} - x_{B'}). \quad (15)$$

Полученные аналитические выражения для расчета площадей взаимодействия устройств, закрепленных на валу камеры смешения по различным схемам, с гомогенизируемым материалом помогают установить значения площадей контакта S_K при различных углах поворота ξ устройств. Определение предельных значений S_K позволяет настроить соответствующие сопротивления при погружении смесительных устройств в слой материала. Использование различных схем установки ОВУ в камерах смешения дает возможность изменять направления и величину силового воздействия на материал, что является важным при гомогенизации композиционных смесей с различными компонентами.

Полученные аналитические выражения необходимы для определения моментов сопротивления при перемешивании композиционных масс, а в дальнейшем – для расчета потребляемой мощности привода камер смешения.

Для изучения процесса гомогенизации смеси одно- и двухзаходными винтовыми устройствами (ДВУ) проведено моделирование процесса смешения в периодическом режиме работы с использованием вышеуказанных устройств (рис. 2). Для изменения энергосилового воздействия рабочих органов (винтовых устройств) на их поверхности установлены сплошные пластины с различной площадью контакта в период погружения в слой материала.

При реализации процесса рециклинга материалов во внутреннем пространстве ОВУ перемещает слой материала и, по мере погружения в него, смещает шихту вдоль винтовой поверхности. Симметричное расположение лопастей ОВУ позволяет реализовать последовательное (через каждые 180°) внутреннее перемещение (рециклинг) материала в центральной части барабана смесителя.

Для реализации процесса микросмешивания двухзаходными винтовыми лопастями использовались устройства без накладных пластин. Двухзаходные винтовые устройства влияют на материал в два раза интенсивнее. За один оборот вала (угол раскрытия поверхности ДВУ $\psi = 90^\circ$) каждая их лопасть обеспечивает двухкратное воздействие на смесь, создавая встречные противоположно направленные потоки, осуществляя при этом внутренний рециклинг композиционной смеси.

При моделировании процесса гомогенизации смеси установлено, что при установке на рабочей винтовой поверхности ОВУ и ДВУ накладных пластин повышается захватывающая способность устройств и силовое воздействие на материал.

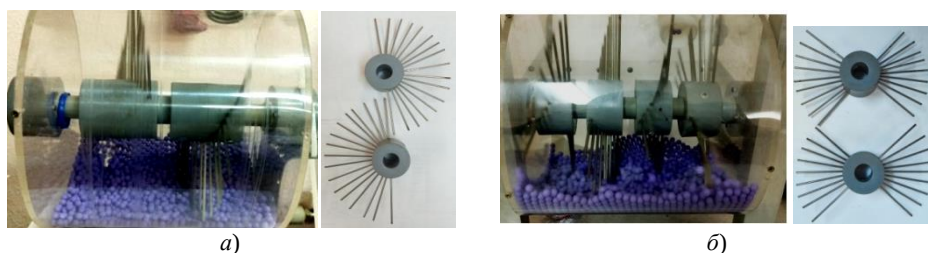


Рис. 2. Стендовые экспериментальные установки с одно- (а) и двухзаходными (б) винтовыми устройствами для моделирования процессов смешения

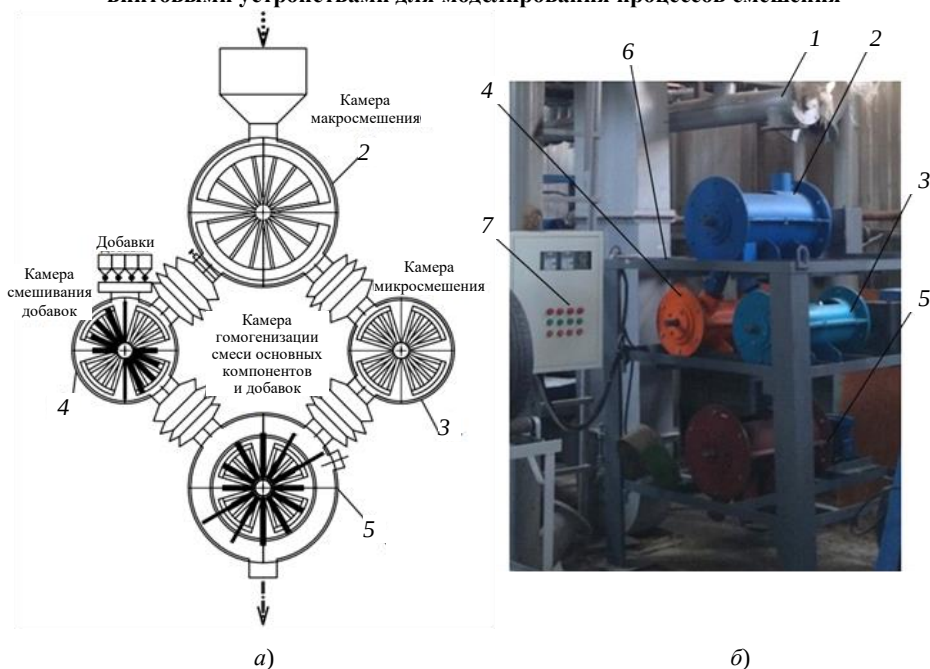


Рис. 3. Рециркуляционный смеситель комбинированного действия:

а – схема компоновки камер агрегата; б – опытно-промышленный агрегат;

1 – транспортирующий шнек; 2 – камера макросмешивания; 3 – камера микросмешивания;

4 – камера смешивания добавок; 5 – камера окончательной гомогенизации;

6 – рама; 7 – пульт управления

Последнее приводит к интенсивному перемещению материала (рециклингу) внутри барабана смесителя. Также выявлено, что при различных значениях частоты вращения вала с устройствами наблюдается интенсификация процесса смешения в различных зонах камеры.

Так, при $n_{\text{ДВУ}} = 20 \dots 80$ об/мин наблюдалось интенсивное перемещение материала в нижней зоне камеры, а при $n_{\text{ДВУ}} = 80 \dots 180$ об/мин – дополнительно и в верхней части камеры. При этом установление объемно-пространственного перемещения материала в верхней части барабана существенно интенсифицирует процесс смешения.

С учетом проведенного моделирования исследуемых процессов разработан рециркуляционный смеситель комбинированного действия [16]. Разработанный на его основе технологический модуль работает следующим образом (рис. 3). Основные компоненты подаются с помощью транспортирующего шнека 1 в камеру макросмешивания 2. Однозаходными лопастями, закрепленными на горизонтальном валу, компоненты перемешиваются рабочими органами – ОВУ. Обработанная в камере 2 смесь разделяется на два потока. Первый поступает в камеру микросмешивания 3, оснащенную двухзаходными лопастями. На смесь совершается четырехкратное воздействие каждой парой ДВУ за один оборот вала, что за счет внутреннего рециклинга существенно интенсифицирует процесс смешения и повышает качество композиционной смеси.

Вторая часть материалов подается в камеру гомогенизации добавок 4, которая оснащена двухзаходными лопастными и П-образным устройствами. За счет

высокоскоростного воздействия рабочих органов материалы основных компонентов вместе с добавками интенсивно перемешиваются. В дальнейшем частично подготовленные в камерах 3 и 4 композиционные смеси подаются в камеру окончательной гомогенизации 5, где перемешиваются, а при необходимости, с подачей связующего – микрогранулируются.

Рециркуляционный смеситель обладает многофункциональными технологическими возможностями за счет использования комбинированных рабочих органов объемно-пространственного воздействия на компоненты композиционной смеси в режиме их рециклинга между парными ОВУ и ДВУ. Обеспечивается интенсивное перемешивание гетерогенных техногенных компонентов композиционной смеси. Реализация в смесителе постадийного процесса смешения гетерогенных компонентов с различными физико-механическими характеристиками (гранулометрическим составом, плотностью, сыпучестью и др.) при разной комбинаторике использования камер позволяет получать высококачественные композиционные смеси широкого спектра использования.

Заключение

Выполненные научно-технические разработки направлены на конструктивно-технологическое совершенствование рабочих органов геометрического профиля и схем установки в камерах постадийного смешения (рециклинга) гетерогенных компонентов композиционных смесей.

Полученные аналитические выражения для расчета площадей контакта S_k винтовых устройств с материалом при различных углах поворота ξ позволяют определить моменты сопротивления при перемешивании композиционных масс и потребляемые мощности приводов камер смешения.

Проведенные экспериментальные исследования по моделированию процессов смешения гетерогенных композиционных смесей с использованием винтовых устройств интенсифицирующего действия различного геометрического профиля, кинематического и силового воздействия подтверждают технологическую целесообразность реализации постадийного внутреннего рециклинга смешиваемых компонентов.

Разработан, изготовлен и экспериментально апробирован патентозащищенный рециркуляционный смеситель комбинированного действия для смешения гетерогенных техногенных компонентов и получения композиционных смесей различного технологического назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN-2024-0002).

Список литературы

1. Разработка щелочеактивированных вяжущих на основе техногенных волокнистых материалов / А. В. Ключев, Н. Ф. Кашапов, С. В. Ключев [и др.] // Строительные материалы и изделия. – 2023. – Т. 6, № 1. – С. 60 – 73. doi: 10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73
2. Экспериментальные исследования процессов структурообразования композиционных смесей с техногенным механоактивированным кремнеземистым компонентом / А. В. Ключев, Н. Ф. Кашапов, С. В. Ключев [и др.] // Строительные

материалы и изделия. – 2023. – Т. 6, № 2. – С. 5 – 18. doi: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18

3. Ресурсоэнергосберегающие технологии и технические средства для переработки твердых коммунальных отходов / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов, Н. Т. Шеин, В. В. Оболонский, В. А. Бабуков // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 319 – 326.

4. Технологические возможности использования термоллиза при переработке техногенных материалов / Н. Т. Шеин, В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов, В. В. Оболонский, Л. И. Шинкарев, М. М. Белых // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды : материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф. (Алушта, 04 – 08 июня 2018 г.). – Белгород, 2018. – Т. III. – С. 200 – 207.

5. Пат. 1009780 СССР, МПК В28С 5/12 (2000.01). Лопасть смесителя / Б. Я. Барер, Б. Л. Кашевник, В. В. Коротеев, Л. М. Райцев ; заявитель и патентообладатель Ордена «Знак почета» объединение по производству строительных материалов, конструкций и деталей «Победа» Главленстройматериалы. – № 3315173 ; заявл. 15.06.1981; опубл. 07.04.1983, Бюл. № 13.

6. Чемеричко, Г. И. Совершенствование конструкции рабочих органов двухвального лопастного смесителя непрерывного действия / Г. И. Чемеричко, Е. В. Порядина // Наукоемкие технологии и инновации : юбилейная Междунар. науч.-практ. конф., посвященная 60-летию БГТУ им. В. Г. Шухова, XXI научные чтения. (Белгород, 09–10 окт. 2014 г.). – Белгород, 2014. – Т. 4. – С. 181 – 184.

7. Пат. 778762 СССР, МПК В01F 7/04 (2000.01). Лопастной смеситель / Ю. А. Поволоцкий, М. Ю. Збарский, О. С. Бурков ; заявитель и патентообладатель Предприятие п/я в-8808, Механический завод № 6 ВТУС. – № 2648491 ; заявл. 24.07.1978 ; опубл. 15.11.1980. Бюл. № 44.

8. Полезная модель 192831 Российская Федерация, МПК В01F 7/02. Лопастной смеситель / В. В. Матюшев, А. В. Семенов, И. А. Чаплыгина, А. С. Аветисян : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2019122007 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 02.10.2019, Бюл. № 28.

9. Пат. 997773 СССР, МПК В01F 7/08 (2000.01). Смеситель / Н. П. Марук, Я. С. Опман, В. В. Борисейкл, В. С. Душкин, А. А. Тереньтьев ; заявитель Белорусский комплексный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт топливной промышленности. – № 3320606 ; заявл. 24.07.1981; опубл. 23.02.1983. Бюл. № 7.

10. Авт. св. 1178608 А1 СССР, МПК В28С 5/14, В01F 7/08. Смеситель для приготовления строительных смесей / Г. Д. Дибров, И. Л. Ветвицкий, Л. А. Хмара, Н. Г. Ильченко ; заявитель Днепропетровский инженерно-строительный ин-т. – № 3740987 ; заявл. 07.03.1984 ; опубл. 15.09.1985.

11. Полезная модель 192657 U1 Российская Федерация, МПК В28С 5/14, В01F 7/04. Смеситель материалов / С. И. Ханин, Н. О. Кикин ; заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский гос. техн. ун-т. им. В. Г. Шухова». – № 2019119931 ; заявл. 25.06.2019 ; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 27.

12. Пат. 2521579 С2 Российская Федерация, МПК В01F 7/02. Способ и устройство для непрерывного смешивания волокон со связующим / В. Франк, Й. Бернс, К. Лемпфер ; заявитель и патентообладатель СИМПЕЛЬКАМП МАШИНЕН-УНД АНЛАГЕНБАУ ГМБХ УНД КО. КГ. – № 2011151080/05 ; заявл. 11.05.2010 ; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18.

13. Полезная модель 64129 U1 Российская Федерация, МПК В28С 5/14, В28С 7/04. Каскадный смеситель / В. В. Горшков, В. Н. Королев, А. И. Косик

[и др.] ; заявитель ФГУП «26 Центральный научно-исследовательский институт». – № 2006121863/22 ; заявл. 21.06.2006 ; опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18.

14. Гарабажиу, А. А. Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей / А. А. Гарабажиу // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 27 – 42.

15. Кикин, Н. О. Совершенствование конструкции рабочих органов смесителей с горизонтальным расположением валов с целью повышения интенсификации смешивания / Н. О. Кикин // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : Посвящена 165-летию В. Г. Шухова (Белгород, 01 – 20 мая 2018 г.). – Белгород, 2018. – С. 2145 – 2149.

16. Пат. 2788202 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Рециркуляционный смеситель комбинированного действия / С. Н. Глаголев, В. С. Севостьянов, А. М. Проценко [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2022112968 ; заявл. 13.05.2022 ; опубл. 17.01.2023. Бюл. № 2. – 19 с.

17. Машины и агрегаты адаптивного действия для селективной переработки природных и техногенных материалов : монография / В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, Л. И. Сиваченко, А. М. Проценко. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2023. – 358 с.

18. Теоретические и экспериментальные исследования рециркуляционного смесителя комбинированного действия / М. В. Севостьянов, А. М. Проценко, В. С. Севостьянов [и др.] // СТИН. – 2023. – № 5. – С. 17 – 20.

Intensification of Homogenization Processes of Mixtures in the Recirculator Mixer

A. M. Protsenko✉

*Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms,
nastya12rudchenko8@gmail.com; Belgorod State Technological University named
after. V. G. Shukhov, Belgorod, Russia*

Keywords: screw devices; modeling; resource saving; recycling; combined action recirculation mixer; mixing; technogenic materials.

Abstract: The results of improving the designs of horizontal mixers for composite mixtures are presented. The intensification of the mixing process is proposed due to the volumetric-spatial influence of the working bodies on the composite mixture and the organization of a stage-by-stage process for obtaining mixtures. The design of a recirculating mixer of combined action has been developed for the preparation of composite mixtures with technogenic heterogeneous components. Analytical expressions are obtained for calculating the contact areas of screw devices with the material at different angles of rotation, which make it possible to determine the moments of resistance when mixing composite masses and the power consumption of the mixing chamber drives. The process of preparing the mixture using single- and double-thrust screw devices of various geometric profiles has been studied.

References

1. Klyuyev A.V., Kashapov N.F., Klyuyev S.V. [et al.], [Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials], *Stroitel'nyye*

materialy i izdeliya [Construction materials and products], 2023, vol. 6, no. 1, pp. 60-73. doi: 10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Klyuyev A.V., Kashapov N.F., Klyuyev S.V. [et al.], [Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanically activated silica component], *Stroitel'nyye materialy i izdeliya* [Construction materials and products], 2023, vol. 6, no. 2, pp. 5-18. doi: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Sevost'yanov V.S., Shamgulov R.Yu., Shein N.T., Obolonskiy V.V., Babukov V.A. [Resource-energy-saving technologies and technical means for processing solid municipal waste], *Energeticheskiye sistemy* [Energy systems], 2019, no. 1, pp. 319-326. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Shein N.T., Sevost'yanov V.S., Shamgulov R.Yu., Obolonskiy V.V., Shinkarev L.I., Belykh M.M. *Innovatsionnyye puti resheniya aktual'nykh problem prirodopol'zovaniya i zashchity okruzhayushchey sredy: materialy dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative ways to solve current problems of environmental management and environmental protection: materials of reports. Intl. scientific-technical conf.], (Alushta, 04-08 June 2018), Belgorod, 2018, vol. III, pp. 200-207. (In Russ.)

5. Barer B.Ya., Kashevnik B.L., Koroteyev V.V., Raytsev L.M. *Lopast' smesitelya* [], USSR, 1983, Pat. 1009780. (In Russ.)

6. Chmerichko G.I., Poryadina Ye.V. *Naukoyemkiye tekhnologii i innovatsii: yubileynaya Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennaya 60-letiyu BGTU im. V.G. Shukhova, XXI nauchnyye chteniya* [Science-intensive technologies and innovations: Anniversary International. scientific-practical Conf., dedicated to the 60th anniversary of BSTU. V.G. Shukhov, XXI scientific readings], (Belgorod, 09-10 October 2014), Belgorod, 2014, vol. 4, pp. 181-184. (In Russ.)

7. Povolotskiy Yu.A., Zbarskiy M.Yu., Burkov O.S. *Lopastnoy smesitel'* [Mixer blade], USSR, 1980, Pat. 778762 (In Russ.)

8. Matyushev V.V., Semenov A.V., Chaplygina I.A., Avetisyan A.S. *Lopastnoy smesitel'* [Mixer blade], Russian Federation, 2019, Utility model 192831. (In Russ.)

9. Maruk N.P., Opman Ya.S., Boriseykl V.V., Dushkin V.S., Teren't'yev A.A. *Smesitel'* [Mixer], USSR, 1983, Pat. 997773 (In Russ.)

10. Dibrov G.D., Vetvitskiy I.L., Khmara L.A., Il'chenko N.G. *Smesitel' dlya prigotovleniya stroitel'nykh smesey* [Mixer for preparing building mixtures], USSR, 1985, Copyright certificate 1178608 (In Russ.)

11. Khanin S.I., Kikin N.O. *Smesitel' materialov* [Mixer of materials], Russian Federation, 2019, Utility model 192657 (In Russ.)

12. Frank V., Berns Y., Lempfer K. *Sposob i ustroystvo dlya nepreryvnogo smeshivaniya volokon so svyazuyushchim* [Method and device for continuous mixing of fibers with a binder], Russian Federation, 2014, Pat. 2521579 (In Russ.)

13. Gorshkov V.V., Korolev V.N., Kosik A.I. [et al.] *Kaskadnyy smesitel'* [Cascade mixer], Russian Federation, 2006, Utility model 64129 (In Russ.)

14. Garabazhiu A.A. [Intensification of the processes of mixing dry bulk materials in modern mixer designs], *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Construction science and technology], 2010, no. 4, pp. 27-42. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Kikin N.O. *Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova: Posvyashchena 165-letiyu V. G. Shukhova* [International scientific-technical conf. young scientists of BSTU named after. V.G. Shukhova: Dedicated to the 165th anniversary of V. G. Shukhov], (Belgorod, 01-20 May 2018), Belgorod, 2018, pp. 2145-2149. (In Russ.)

16. Glagolev S.N., Sevost'yanov V.S., Protsenko A.M. [et al.] *Retsirkulyatsionnyy smesitel' kombinirovannogo deystviya* [Recirculation mixer of combined action], Russian Federation, 2023, Pat. 2788202 (In Russ.)

17. Sevost'yanov V.S., Ural'skiy V.I., Sivachenko L.I., Protsenko A.M. *Mashiny i agregaty adaptivnogo deystviya dlya selektivnoy pererabotki prirodnnykh i tekhnogennykh materialov: monografiya* [Machines and units of adaptive action for selective processing of natural and man-made materials: monograph], Belgorod: Izdatel'stvo BGTU, 2023, 358 p. (In Russ.)

18. Sevost'yanov M.V., Protsenko A.M., Sevost'yanov V.S. [et al.] [Theoretical and experimental studies of a recirculation mixer of combined action], *STIN* [], 2023, no. 5, pp. 17-20. (In Russ., abstract in Eng.)

Intensivierung der Homogenisierungsverfahren von Gemischen im Recycling-Mischer

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Verbesserung der Konstruktionen von Horizontalmischern für Verbundmischungen vorgestellt. Es ist die Intensivierung des Mischprozesses durch die volumen-räumliche Einwirkung der Arbeitskörper auf die Verbundmischung und die Organisation des stufenweisen Prozesses der Mischungsherstellung vorgeschlagen. Es ist der Entwurf des kombinierten Recycling-Mischers für die Herstellung von Verbundmischungen mit technogenen heterogenen Komponenten entwickelt. Es sind analytische Ausdrücke für die Berechnung der Kontaktflächen der Schneckenvorrichtungen mit dem Material bei verschiedenen Winkeln ihrer Drehung erhalten, die es ermöglichen, die Widerstandsmomente beim Mischen von Verbundmassen und die verbrauchte Leistung der Mischkammerantriebe zu bestimmen. Der Prozess der Mischungsvorbereitung mithilfe von Einzel- und Doppelschneckenvorrichtungen mit verschiedenen geometrischen Profilen ist untersucht.

Intensification des processus d'homogénéisation des mélanges dans le mélangeur de recyclage

Résumé: Sont présentés les résultats du perfectionnement de la conception des mélangeurs horizontaux pour les mélanges composites. Est proposé d'intensifier le processus de mélange en raison de l'impact volumétrique et spatial des organes de travail sur le mélange composite et de l'organisation du processus post-stade de la préparation des mélanges. Est élaborée la conception du mélangeur de recyclage à action combinée pour la préparation des mélanges composites avec des composants hétérogènes artificiels. Sont obtenues des expressions analytiques pour le calcul des zones de contact des dispositifs à vis avec le matériau à différents angles de rotation, ce qui permet de déterminer les moments de résistance lors du mélange des masses composites et la consommation d'énergie des entraînements des chambres de mélange. Est étudié le processus de la préparation du mélange avec des dispositifs à vis à une et à deux voies de différents profils géométriques.

Автор: Проценко Анастасия Максимовна – аспирант, инженер кафедры технологических комплексов, машин и механизмов, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия.

ДЛЯ ЗАМЕТОК