

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***

2021. Том 27. № 3.

**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

Гатапова Наталья Цибиковна, д-р техн. наук, профессор, **главный редактор**, ФГБОУ ВО «ТГТУ», +7 4752 63 72 39; эл. почта: gatapova.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, Dr.-Ing, Ростокский университет, Германия

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

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 обл., г. Тамбов, ул. Советская, д. 106.
Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».
Эл. почта: gatapova.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, С. Ю. Прохорская.

Подписано в печать 11.10.2021 г. Дата выхода в свет 22.10.2021 г.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 14,88; уч.-изд. л. 17,00. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 037.

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», 2021
© Коллектив авторов, 2021

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

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

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: 106, 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 обл., г. Тамбов, ул. Советская, д. 106.

E-mail: tstu@admin.tstu.ru

Средство массовой информации 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	336
Мартыанов Е. И., Карпушкин С. В., Алексеев В. В. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем	336
Кудряшов М. А., Белоусов О. А., Дмитриевцев А. Ю., Кириупин М. М. Синтез квадрифилярного излучателя для радиолокационных станций аэрологического зондирования	345
Блюмин С. Л., Щеглеватых Р. В., Найденов А. А., Сысоев А. С. Система выявления аномальных наблюдений в данных об оказании медицинской помощи населению	356
Ненадович Д. М., Маркин И. В. Методика формирования оценочных значений экспертных показателей производительности перспективных автоматизированных цифровых телекоммуникационных систем	368
Алгазин Е. И. Описание состояния во времени линейных систем автоматизации как следствия процессов накопления и диссипации энергии	380
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	387
Акулинин Е. И., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И. Экспериментальное исследование кинетики циклического адсорбционного процесса обогащения воздуха кислородом	387
Меренцов Н. А., Балашов В. А., Голованчиков А. Б., Топилин М. В., Персидский А. В. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 3. Уравнения для аппроксимации фильтрационной кривой	401
Лазарев С. И., Ломакина О. В., Буланов В. Е., Хорохорина И. В. К вопросу проектирования баромембранных аппаратов комбинированного типа	415
Никитин Д. В., Родионов Ю. В., Махмуд М. А. С., Скоморохова А. И., Пахомов А. Н., Зорин А. С. Жидкостнокольцевые вакуум-насосы для тепло- и массообменных процессов	428
Синиуткина С. Е., Шубина А. Г., Розенблюм Л. В. Влияние халконов и флаванов на зимазную активность дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	442
Математика. Физика	449
Нахман А. Д. Ограниченность семейств операторов свертки в пространствах L^p ...	449
Материаловедение. Нанотехнологии	461
Лоскутова А. Д., Королев А. П. Анализ характеристик термочувствительных элементов в средствах контроля теплофизических свойств материалов	461
Ярцев В. П., Крюкова А. А. Сравнение теплотехнических характеристик пенополистирола и минеральной ваты в условиях атмосферных воздействий	468
Аль-Джарах Р. А., Першин В. Ф., Осипов А. А. Производство графеносодержащих суспензий жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита	476
Воронин Н. В., Родионов Ю. В., Никитин Д. В., Филатов И. С. Определение сил воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнитотермического поверхностного армирования изделий из термопластичных полимеров	486
Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук	497

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	336
Martyanov E. I., Karpushkin S. V., Alekseev V. V. A Problem-Oriented System of Control and Optimization of Basic Parameters of Technical Complex Systems	336
Kudryashov M. A., Belousov O. A., Dmitriyev A. Yu., Kiryupin M. M. Synthesis of a Square Radiator for Aerological Sensing Radar Stations.....	345
Blyumin S. L., Scheglevatykh R. V., Naydenov A. A., Sysoev A. S. A System for Detecting Anomalous Observations in Data on Healthcare Services	356
Nenadovich D. M., Markin I. V. Methodology for the Formation of Assessment Values of Expert Performance Indicators for Perspective Automated Digital Telecommunication Systems	368
Algazin E. I. Description of the State in Time of Linear Automation Systems as a Consequence of Accumulation and Dissipation of Energy	380
Chemical Engineering and Related Industries.	
Chemistry	387
Akulinin E. I., Dvoretzky D. S., Dvoretzky S. I. The Experimental Study of the Kinetics of the Cyclic Adsorption Process of Air Enrichment with Oxygen.....	387
Merentsov N. A., Balashov V. A., Golovanchikov A. B., Topilin M. V., Persidskiy A. V. The Structure of Filter Curve and Methods of Its Approximation. Part 3. Equations for Filter Curve Approximation	401
Lazarev S. I., Lomakina O. V., Bulanov V. E., Khorokhorina I. V. To the Question of Designing Baromembrane Combined Type Apparatus.....	415
Nikitin D. V., Rodionov Yu. V., Makhmud M. A. S., Skomorokhova A. I., Pakhomov A. N., Zorin A. S. Liquid Ring Vacuum Pumps for Heat and Mass Transfer Processes	428
Sinyutina S. E., Shubina A. G., Rosenblum L. V. The Effect of Chalcones and Flavanones on Zymase Fermentation of <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	442
Mathematics. Physics	449
Nakhman A. D. Restriction of Families of Conversion Operators in L^p Spaces.....	449
Material Science. Nanotechnology	461
Loskutova A. D., Korolev A. P. The Analysis of Properties of Thermal Sensitive Elements in Measuring Devices for Thermal Properties of Materials.....	461
Yartsev V. P., Kryukova A. A. The Comparison of Thermal Characteristics of Polystyrene Foam and Mineral Wool under Atmospheric Impact.....	468
Al-Jarakh R. A., Pershin V. F., Osipov A. A. Production of Graphene-Containing Suspensions for Liquid-Phase Shear Exfoliation of Graphite	476
Voronin N. V., Rodionov Yu. V., Nikitin D. V., Filatov I. S. Determining Impact Forces on a Ferromagnetic Particle in the Process of Magnetothermal Surface Reinforcement of Products from Thermoplastic Polymers	486
New Professors, Doctors and Candidates of Sciences	497

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Е. И. Мартьянов¹, С. В. Карпушкин¹, В. В. Алексеев²

*Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
martyanovei@gmail.com; «Информационные системы и защита информации» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: методика разработки системы; оптимизация; проблемно-ориентированная система; технически сложные системы.

Аннотация: Предложена методика разработки системы управления и оптимизации, применяемая при решении задач проектирования технически сложных систем. Разработанные на основе данной методики системы просты в применении и позволяют получать более точные оценки значений параметров технически сложных систем, чем при помощи традиционных методик, основанных на решении эмпирических уравнений. В качестве примера реализации предложенной методики рассмотрена проблемно-ориентированная система, предназначенная для оптимизации параметров двухлопастной мешалки вертикального емкостного аппарата.

Введение

К технически сложным системам (объектам) относят практически все технологическое оборудование, которое обладает сложным внутренним устройством и выполняет функции, заданные пользователем, на высокотехнологическом уровне, задействует различные энергоресурсы или преобразует их в другой вид энергии. Все эти изделия объединяет необходимость использовать при их проектировании сложные математические конструкции, предусматривающие решение систем дифференциальных уравнений с частными производными. Для промышленных предприятий данный подход недоступен, так как для его реализации требуется высококвалифицированный персонал и большие затраты времени, поэтому обычно применяется либо физический эксперимент в конкретной производственной ситуации, либо используют методики, основанные на решении эмпирических уравнений, разработанные головными организациями. Такой подход требует значительных затрат времени на разработку и внедрение, а также существенных материальных затрат и не всегда дает достоверные результаты. Например, достоверность результатов применения эмпирических методик определения конструктивных параметров и режимных характеристик механических мешалок вертикальных емкостных аппаратов, широко применяемых в химической и фармацевтической промышленности, часто сомнительна, так как методики основаны на результатах проведения физического эксперимента в конкретных условиях, изменения которых могут привести к ошибочным, а иногда к совершенно не достоверным результатам [1].

Более достоверные результаты можно получить с применением систем инженерного анализа: ANSYS, COMSOL, STAR-CD, QForm, NASTRAN или Fluent [2]. Однако применение данных интегрированных программных комплексов ограничено высокими требованиями к возможностям используемой компьютерной техники и требует высокой квалификации персонала. Эти комплексы ориентированы на решение широкого круга задач, но при этом необходимы настройки на рассматриваемую предметную область. Некорректные настройки могут привести к потерям в скорости вычисления и точности получаемых результатов. Поэтому актуальна разработка проблемно-ориентированных систем для расчета конструктивных параметров и режимных характеристик, позволяющих повысить скорость и увеличить точность вычислений за счет применения специализированных методов и алгоритмов реализации проектных расчетов рассматриваемой системы.

Постановка задачи

Разработка подобных интегрированных систем базируется на формулировке конкретной задачи [3]. Для большей наглядности рассмотрим задачу определения основных параметров двухлопастной мешалки для вертикального емкостного аппарата: при фиксированном диаметре D_t и высоте H_t аппарата необходимо найти диаметр мешалки D_m , высоту ее лопасти H_m , высоту установки над днищем аппарата H_{hm} и частоту вращения n , при которых суммарный вектор скорости потока жидкости достигает максимума при допустимых затратах мощности на перемешивание.

Конструктивные параметры мешалки D_m , H_m и H_{hm} являются определяющими для перемешивающего устройства, но их изменения не приводят к снижению технологичности изготовления аппарата в целом. При технических перевооружениях производств или переналадке оборудования изменения в конструкциях емкостных аппаратов чаще всего сводятся к подбору и изготовлению нового перемешивающего устройства. Определяющие размеры аппарата D_t и H_t , как правило, являются стандартизированными и определяются либо технологическими возможностями производства, либо стандартами. Частота вращения мешалки n оказывает наибольшее влияние на интенсивность перемешивания и, как следствие, на эффективность аппарата в целом. Интервалы допустимых значений варьируемых параметров:

$$D_m \in [0,1 D_t, 0,9 D_t]; \quad (1)$$

$$H_m \in [0,01 D_m, 0,2 D_m]; \quad (2)$$

$$H_{hm} \in [0,4 D_m, 0,8 H_t]; \quad (3)$$

$$n \in [0, 200]. \quad (4)$$

Для соблюдения норм и правил проектирования технологического оборудования вводится интервал (1) [3, 4]; (2) и (3) используются для ограничения линейных размеров перемешивающего устройства в соответствии с требованиями [5]; (4) также определяется требованиями [5].

Толщина лопасти мешалки S_m практически не оказывает влияния на процесс перемешивания и определяется по формуле

$$S_m = 0,1 H_m. \quad (5)$$

Основным критерием оптимальности является суммарный вектор скорости перемещения перемешиваемой среды $K1$, который определяется как сумма всех векторов скорости в рассматриваемом объекте:

$$K1 = \sum_{i=1}^z \bar{u}_i, \quad (6)$$

где z – общее число узлов в расчетной модели; $\bar{u}_i$ – вектор скорости в i -м узле расчетной модели.

Поскольку скорость перемешиваемой среды нельзя увеличивать бесконечно, в постановку задачи введено дополнительное ограничение на значение мощности, затрачиваемой на перемешивание, компенсирующее чрезмерный рост суммарного вектора скорости:

$$N = K_N \rho n^3 D_m^5 \leq N_{\max}, \quad (7)$$

где K_N – критерий мощности перемешивания [4 – 6]; ρ – плотность перемешиваемой среды.

Выбор языка программирования

Разработка системы оптимизации технического объекта предусматривает наличие математической модели его конструкции и режима функционирования, а также обоснование выбора языка программирования, на котором она будет реализована. Выбранный язык должен обладать достаточным набором функций и инструментов, чтобы реализовать весь требуемый функционал разрабатываемой системы. Помимо этого он должен обладать достаточным быстродействием и быть кроссплатформенным.

На данный момент существует множество языков программирования, пригодных для разработки данных систем. На основе рекомендаций [7] и имеющегося опыта [8, 9] рассмотрены следующие языки программирования: Python, Java, Ruby, PHP, C++ и Perl, так как они являются наиболее подходящими для решения подобных задач. В результате анализа и сравнения характеристик данных языков, принято решение использовать язык Python, который характеризуется следующими особенностями.

1. В языке программирования Python высокоуровневые типы данных, и их динамическая типизация короче, чем в программах на Java.

2. Несмотря на то что Perl и Python во многом схожи, Perl поддерживает общие прикладные задачи, такие как создание отчетов, сканирование файлов и т.д., а Python – общие методологии программирования, такие как проектирование структуры данных и объектно-ориентированное программирование.

3. В Python классы широко используются в стандартной библиотеке, в то время как PHP имеет стандартную библиотеку, полностью основанную на классах.

4. Python поддерживает основные структуры графического интерфейса пользователя (GUI).

5. По сравнению с Ruby, Python обладает большим набором структур данных, внутренних функций, лучшей обработкой пространства имен, использованием модулей и итераторов.

6. Python поддерживает множественное наследование, а Ruby – нет.

7. Код Python значительно короче, чем большинство других языков программирования, таких как C или C++.

Алгоритм работы системы

Алгоритм работы системы оптимизации параметров механической мешалки представлен в виде схемы на рис. 1.

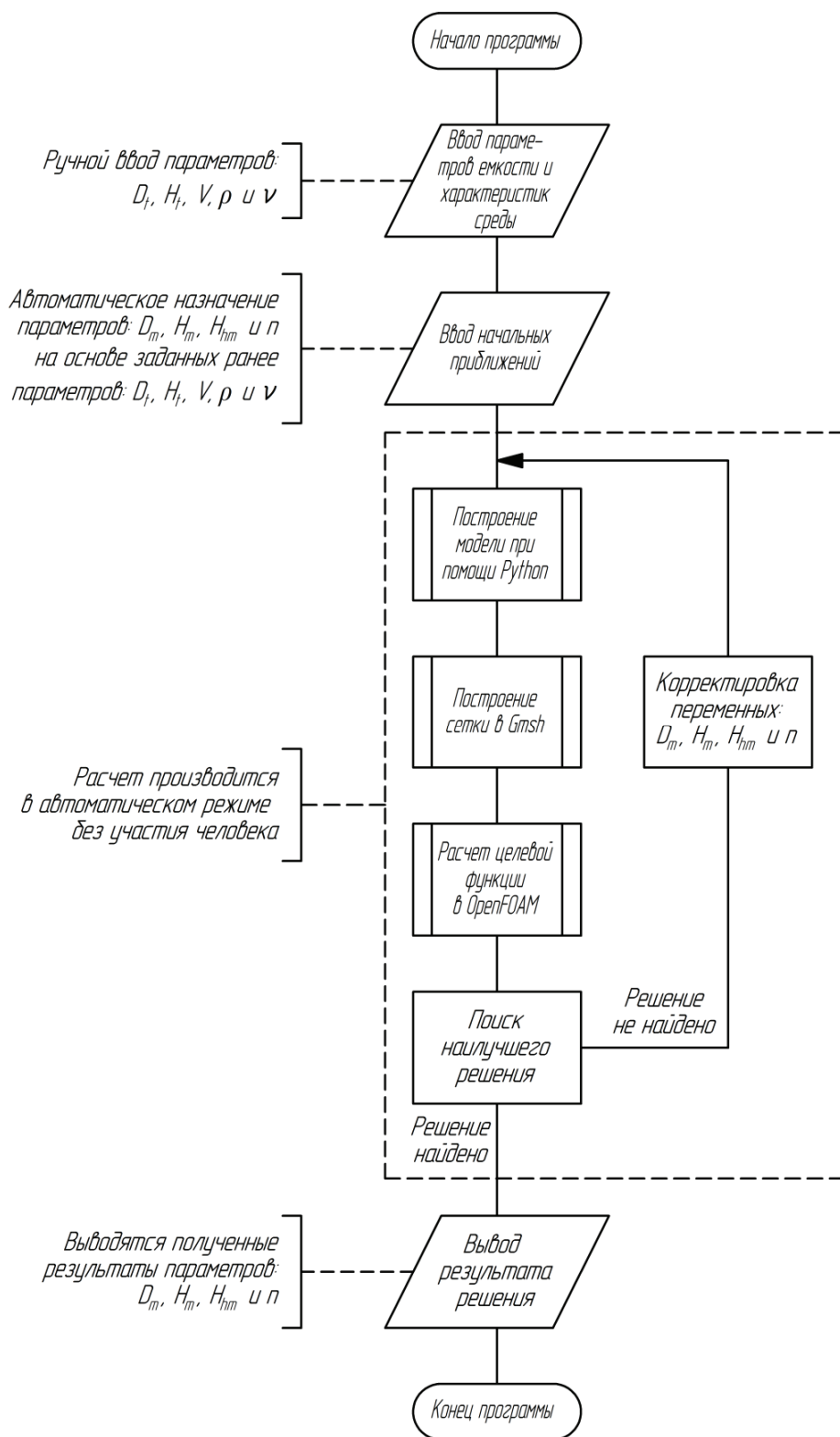


Рис. 1. Схема работы проблемно-ориентированной системы оптимизации

По окончании ввода значений фиксированных параметров: D_t , H_t , V (объем жидкости) и начальных значений варьируемых параметров: D_m , H_m , H_{hm} и n при помощи программных средств языка программирования Python строится 3D-модель рассматриваемого объекта. Данный процесс происходит в фоновом режиме и без участия оператора. Ввиду того, что не приходится использовать графический интерфейс и обрисовывать детали объекта, существенно снижаются требования к вычислительным ресурсам. Продолжительность построения модели не превышает нескольких секунд.

3D-модель и исходные данные передаются в программу Gmsh, где происходит генерация сетки конечных элементов (КЭ) по заданному алгоритму. Программа Gmsh – 3D-генератор конечных элементов с открытым исходным кодом – быстрый, легкий и удобный инструмент создания сетки КЭ с параметрическим вводом [9]. Он работает на языке программирования C++, но может использовать и Python. С его помощью можно формировать сетки любой конфигурации и сложности, как с применением встроенных алгоритмов, так и с помощью собственных. Так же как и Python, Gmsh не использует графический интерфейс и, следовательно, практически не расходует вычислительные ресурсы компьютера.

Параметры сформированной сетки передаются в программу OpenFOAM, где происходит расчет поля скоростей в аппарате. OpenFOAM – свободно распространяемый инструментальный вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными). Он предназначен для реализации задач гидродинамики ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей, как несжимаемых, так и сжимаемых, с учетом конвективного теплообмена и действия сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS-моделей, LES- и DNS-методов, также вероятно решение дозвуковых, околосзвуковых и сверхзвуковых задач. OpenFOAM позволяет выполнять и другие задачи:

- прочностные расчеты;
- задачи теплопроводности в твердом теле;
- многофазные задачи, в том числе с описанием химических реакций компонент потока;
- задачи, связанные с деформацией расчетной сетки;
- задачи, при математической постановке которых требуется решение дифференциальных уравнений в частных производных в условиях сложной геометрии объекта.

В основе программы лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, как стационарных, так и нестационарных. В терминах программы OpenFOAM большинство дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора – выбран пользователем в процессе расчета. Таким образом, полностью разделяются формирование расчетной сетки КЭ (метод дискретизации), дискретизация основных уравнений и их решение.

Для расчета целевых показателей в программе OpenFOAM использовалась разработанная ранее математическая модель [8]. Работа программы OpenFOAM осуществляется в фоновом режиме.

Поиск значений варьируемых параметров, соответствующих условному максимуму суммарного вектора скорости перемешиваемой среды, осуществлялся методом штрафных функций. Алгоритм метода реализован на языке программирования Python. Поиск проходил в фоновом режиме без участия оператора.

Анализ результатов исследования

Для проверки предложенного подхода проведено сравнение данных, полученных в ходе эксперимента, с данными, полученными при расчете в программных комплексах ANSYS и COMSOL, а также в разработанной программной системе.

Для расчетов использовался ПК со следующими характеристиками:

- процессор Intel Pentium 2020M (2.4 ГГц);
- оперативная память 8 ГБ DDR3 (800 МГц);
- видеокарта NVIDIA GeForce GT 720M 2 ГБ (DDR3);
- жесткий диск WD Blue 500 ГБ (5400 об/мин).

Полученные результаты сведены в табл. 1.

Как видно, применение программных интерактивных комплексов в разы сокращает затраты времени на получение результата. Указанное в строке «Данные эксперимента» время является фактически затраченным на каждый замер мощности с учетом проверки и переналадки оборудования. Суть эксперимента заключалась в определении потребляемой мощности электродвигателя косвенным методом – через замер тока на обмотке электродвигателя.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов

Параметр	Частота вращения мешалки, об/мин	Мощность, мВт	Отклонение по мощности от данных по эксперименту, %	Число элементов в модели	Время расчета (исследования), с	Отклонение по времени от расчета в разработанной программе, %
Данные эксперимента	20 40 60 80 100	0,35 2,47 8,10 19,30 38,50	–		54 000	~ +35 000
Расчеты в: ANSYS	20 40 60 80 100	0,32 2,25 7,74 18,60 36,90	–9 –10 –5 –4 –4	220 103	149 137 183 224 272	–2 +8 +30 +35 +47
COMSOL	20 40 60 80 100	0,28 2,08 7,12 17,20 35,10	–25 –18 –14 –12 –10		156 168 216 252 336	+3 +32 +53 +52 +82
разработанной программе	20 40 60 80 100	0,38 2,54 7,89 18,91 36,96	+9 +3 –2 –2 –4	210 401	152 127 141 166 185	–

Время, указанное в строках «Расчет в ANSYS» и «Расчет в COMSOL», дано без учета продолжительности построения модели и расчетной сетки, то есть время, затрачиваемое только на однократный расчет. Время, указанное в строке «Расчет в разработанной программе», учитывает весь цикл расчета без процесса оптимизации. В него также входит время, затрачиваемое на построение модели с последующей генерацией сетки и расчетом параметров.

Заключение

Доказана эффективность предложенного подхода к решению задач проектирования механических перемешивающих устройств. Предлагаемая проблемно-ориентированная программная система дает более точные результаты (отклонение от полученных экспериментальных данных не превышает 10 %) за более короткий промежуток времени (продолжительность расчета в некоторых случаях практически в 2 раза меньше чем у аналогичных программ).

Предложенный алгоритм разработки программной системы может быть применен к задачам проектирования других изделий, для математического описания которых используются системы дифференциальных уравнений с частными производными, например, задачам по определению:

- температурных полей рабочих поверхностей нагревательных плит вулканизационных гидравлических прессов;
- эффективности очистки газов в циклонах или скрубберах;
- продольного сечения балок металлических конструкций грузоподъемных сооружений и строительных металлических ферм;
- конструкции несущих элементов, располагающихся на открытом воздухе в различных климатических зонах, на которые воздействуют ветровые нагрузки или атмосферные осадки.

Подобный подход будет полезен для конструкторских и проектных отделов промышленных предприятий, где разрабатывают типовые изделия разной конфигурации и широкой номенклатуры или размерного ряда, а именно для предприятий химического машиностроения, тяжелого машиностроения, станкостроительных и приборостроительных заводов.

Список литературы

1. Мартянов, Е. И. Применение систем автоматизированного расчета для проектирования лопастных мешалок / Е. И. Мартянов, Е. Н. Малыгин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 14 – 16 ноября 2018 г., Тамбов. – Тамбов : Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Вып. 5, Т. 1. – С. 549 – 553.
2. Компьютерный инжиниринг : учеб. пособие / А. И. Боровков, В. С. Бурдаков, О. И. Клявин [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
3. Малыгин, Е. Н. Математические методы в технических расчетах : учеб. пособие / Е. Н. Малыгин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с.
4. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
5. РД 26-01-90-85 Руководящий нормативный документ. Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. – Взамен РТМ 26-01-90-76 ; введ. 1986-01-01. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
6. Лашинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : справ. / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.

7. Хайнеман, Д. Алгоритмы. Справочник с примерами на C, C++, Java и Python : пер. с англ. / Д. Хайнеман, Г. Поллис, С. Селков. – 2-е изд. – СПб. : ООО «Альфа-книга», 2017. – 432 с.

8. Мартъянов, Е. И. Математическое описание полей скоростей в аппарате с мешалкой / Е. И. Мартъянов, Е. Н. Малыгин // Известия Санкт-Петербургского гос. технологического ин-та (техн. ун-та). – 2020. – № 54 (80). – С. 107 – 111.

9. Geuzaine, C. Gmsh: a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities / C. Geuzaine, J.-F. Remacle // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – Vol. 79, Issue 11. – P. 1309 – 1331.

A Problem-Oriented System of Control and Optimization of Basic Parameters of Technical Complex Systems

E. I. Mart'yanov¹, S. V. Karpushkin¹, V. V. Alekseev²

*Departments of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),
martyanovei@gmail.com; Information Systems and Data Protection (2),
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: system development methodology; optimization; problem-oriented system; technically complex systems.

Abstract: The paper proposes a methodology for the development of a control and optimization system, which is used to solve the design problems of technical complex systems. The systems developed on the basis of this methodology are easy to use and create more accurate estimates of the values of the parameters of technical complex systems than using traditional methods based on solving empirical equations. An example of the implementation of the proposed methodology is a problem-oriented system designed to optimize the parameters of a two-blade mixer of a vertical capacitive apparatus.

References

1. Mart'yanov Ye.I., Malygin Ye.N. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn* [Virtual modeling, prototyping and industrial design], Proceedings of the V International scientific-practical conference, 14 - 16 November, 2018, Tambov, 2018, issue 5, vol. 1, pp. 549-553. (In Russ.)

2. Borovkov A.I., Burdakov V.S., Klyavin O.I. [et al.] *Komp'yuternyy inzhiniring: uchebnoye posobiye* [Computer engineering: a tutorial], St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2012, 93 p. (In Russ.)

3. Malygin Ye.N. *Matematicheskiye metody v tekhnicheskikh raschetakh: uchebnoye posobiye* [Mathematical methods in technical calculations: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo GOU VPO TGTU, 2010, 80 p. (In Russ.)

4. Braginskiy L.N., Begachev V.I., Barabash V.M. *Peremeshivaniye v zhidkikh sredakh. Fizicheskiye osnovy i inzhenernyye metody rascheta* [Stirring in liquid media. Physical foundations and engineering methods of calculation], Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (In Russ.)

5. RD 26-01-90-85 *Rukovodyashchiy normativnyy dokument. Mekhanicheskkiye peremeshivayushchiye ustroystva. Metod rascheta* [RD 26-01-90-85 Guiding normative document. Mechanical stirring devices. Calculation method], Leningrad: RTP LenNIIkhimmasha, 1985, 257 p. (In Russ.)

6. Lashchinskiy A.A., Tolchinskiy A.R. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoy apparatury: spravochnik* [Fundamentals of design and calculation of chemical equipment: a reference book], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1970, 752 p. (In Russ.)

7. Khayneman D., Pollis G., Selkov S. *Algoritmy. Spravochnik s primerami na C, C++, Java i Python* [Algorithms. Reference with examples in C, C++, Java and Python], St. Petersburg: OOO "Al'fa-kniga", 2017, 432 p. (In Russ.)

8. Mart'yanov Ye.I., Malygin Ye.N. [Mathematical description of velocity fields in an apparatus with a stirrer], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2020, no. 54 (80), pp. 107-111. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, vol. 79, issue 11, pp. 1309-1331.

Problemorientiertes Steuerungs- und Optimierungssystem der wichtigsten Parameter von technisch komplexen Systemen

Zusammenfassung: Es ist die Methodik zur Entwicklung des Steuerungs- und Optimierungssystems vorgeschlagen, die zur Lösung von Entwurfsproblemen technisch komplexer Systeme verwendet wird. Die auf der Grundlage dieser Technik entwickelten Systeme sind einfach zu bedienen und ermöglichen genauere Schätzungen der Parameterwerte technisch komplexer Systeme als mit herkömmlichen Methoden, die auf der Lösung empirischer Gleichungen basieren. Als Beispiel für die Umsetzung der vorgeschlagenen Methodik wird ein problemorientiertes System betrachtet, entworfen zur Optimierung der Parameter des Zweiflügelmischers der vertikalen Behälterapparatur.

Système de la gestion et de l'optimisation axé sur les problèmes des principaux paramètres des systèmes techniques complexes

Résumé: Est proposée la méthode de la mise au point du système de la gestion et de l'exploitation utilisé pour résoudre les problèmes de la conception des systèmes techniques complexes. Les systèmes mis au point à partir de cette méthode sont faciles à utiliser et permettent d'obtenir des estimations plus précises des valeurs des paramètres des systèmes techniques complexes en comparaison avec les méthodes traditionnelles basées sur la résolution des équations empiriques. À titre d'exemple de la mise en œuvre de la méthode proposée est considérée un système axé sur les problèmes qui est conçu pour optimiser les paramètres de l'agitateur à deux pales de l'appareil capacitif vertical.

Авторы: *Мартьянов Евгений Игоревич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Алексеев Владимир Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Зайцев Александр Владимирович* – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГКВУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» МО РФ, г. Балашиха, Московская обл., Россия.

СИНТЕЗ КВАДРИФИЛЯРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

М. А. Кудряшов, О. А. Белоусов, А. Ю. Дмитриевцев, М. М. Кириупин

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
maximkudryashov969@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аэрологический локатор; аэрологическое зондирование; квадрифилярная спиральная антенна; радиолокационная станция; феноменологическая модель.

Аннотация: Рассмотрены основные аспекты синтеза квадрифилярного излучателя. Аргументирован выбор излучателя и показана его математическая модель. Обосновано применение метода феноменологических моделей. Проведено компьютерное моделирование двух моделей квадрифилярного излучателя в комплексе электродинамического моделирования и приведены получившиеся электродинамические характеристики. Дано сравнение двух феноменологических моделей и мотивировано их применение в составе антенной решетки, используемой в комплексах станций аэрологического радиомониторинга.

В настоящее время существуют различные системы аэрологического зондирования, такие как МАРЛ-А, АВК-1, AIR-3A-RT2, RT-20, МРЗ-3АТ, обладающие следующими характеристиками: рабочая частота – 1680 МГц, 1790 МГц; тип излучающих систем: зеркальная, пассивная антенная решетка (АР), адаптивная фазированная антенная решетка (АФАР) [1].

Данные комплексы достаточно громоздки, обладают рядом недостатков, таких как малое количество ведения радиозондов (до 5 целей одновременно), небольшая дальность сопровождения зонда (до 20...40 км), невозможность быстрого управления лучом, в горизонтальной плоскости $\pm 180^\circ$ при скорости 30...40 рад/с, а в вертикальной плоскости от -30 до $+140^\circ$ при скорости 20 рад/с. Ключевым элементом всех аэрологических локаторов является антенная система (АР). От ее характеристик существенным образом зависит качество функционирования таких комплексов в целом. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо разработать антенные системы, которые лишены указанных выше недостатков. К таким системам можно отнести следующие АР: адаптивные, фазированные, адаптивные фазированные и использующие алгоритмы управления на базе искусственного интеллекта. Одним из важных этапов разработки АР является выбор или синтез нового излучателя. Для решения задач аэрологического мониторинга наиболее оптимальным образом подходят излучатели на основе замедляющих структур, в частности спиральные излучатели [2]. Все многообразие спиральных излучателей может быть сведено к двум основным типам: классиче-

ские и квадрифилярные [3]. Последние по сравнению с традиционными спиральными антеннами обладают лучшими характеристиками, такими как электродинамические и массо-габаритные.

Для решения поставленной задачи проведем синтез квадрифилярной спиральной антенны (КСА) в диапазоне 1678 МГц, который входит в состав в качестве элемента интеллектуальной фазированной антенной решетки.

Квадрифилярный спиральный излучатель представляет собой антенную систему, состоящую из четырех излучателей, сдвинутых друг относительно друга на 90° , каждый из которых представляет собой металлический проводник, изогнутый вдоль спиральной линии. На основании данной антенны имеются элементы питания, которые возбуждают излучатели. Напряжение на элементах питания антенны формируется с помощью специальной схемы питания [3].

Для того чтобы данная антенна излучала с круговой поляризацией, напряжения должны формироваться с одинаковыми амплитудами, но сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90° . На рисунке 1 показана модель простейшей КСА, образованной ленточными проводниками. Такие КСА имеют свободные параметры, к которым можно отнести угол намотки α и диаметр D . Чтобы управлять характеристиками излучения антенны, такими как диаграмма направленности (ДН) и коэффициент эллиптичности, достаточно менять данные параметры. К свободным параметрам также можно отнести диаметр проводника d , если он имеет круглую форму сечения, либо ширину w , когда в качестве проводника используется металлическая лента, однако данные параметры не столь существенно влияют на характеристики квадрифилярного спирального излучателя, вследствие чего их можно не брать во внимание.

Для дальнейшего синтеза излучателя необходимо определить его электродинамические и геометрические характеристики.

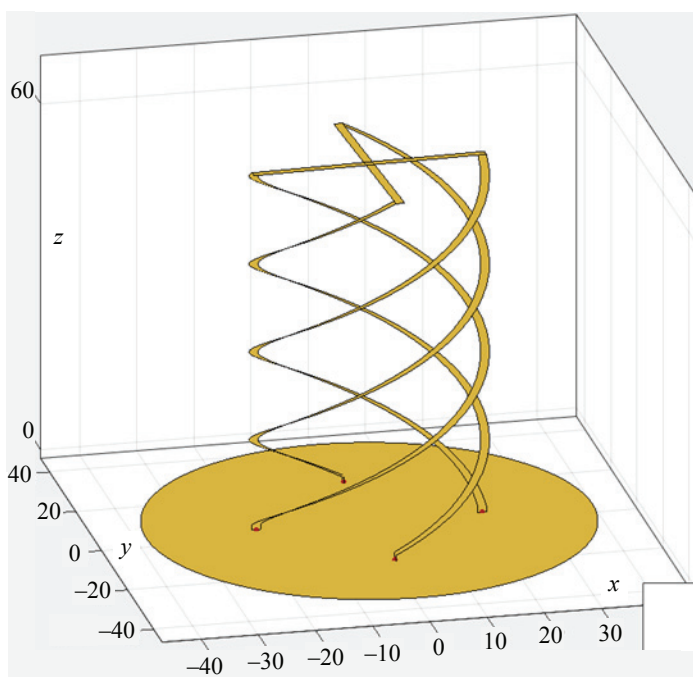


Рис. 1. Модель КСА в программном пакете MATLAB

Коэффициент поляризации можно определить, используя следующее выражение:

$$P = \sqrt{\frac{m^2 \cos^2 \vartheta - m \sin 2\vartheta \cos \tau + \sin^2 \vartheta}{m^2 \sin^2 \vartheta + m \sin 2\vartheta \cos \tau + \cos^2 \vartheta}}, \quad (1)$$

где $m = |E_\varphi|/|E_\theta|$, $\tau = \arg E_\varphi - \arg E_\theta$, $\operatorname{tg} 2\vartheta = \cos 2m/(1 - m^2)$; ϑ – угол преимущественной поляризации.

Далее описаны фазовые характеристики излучателя. Под данным термином подразумевается величина

$$\Phi(\theta, \varphi) = \Psi(0, 0) - \Psi(0, \varphi), \quad (2)$$

где $\Psi(0, 0)$, $\Psi(0, \varphi)$ – фазы поля спирали соответственно в точке с координатами $R_0, 0, 0$ и в некоторой точке дальней зоны, имеющей координаты R_0, θ, φ .

Если рассматривать фазовую характеристику с учетом только одной резонирующей гармоники, получим:

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, \varphi) &\approx [y_0(\theta) - y_0(0)] \pi N + \varphi + \Phi_0(\theta); \\ \Phi(\theta, \varphi) &\approx [y_0(\theta) - y_0(0)] \pi N + \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

при этом

$$\Phi_0(\theta) = \arctg[2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta J_1(ka \sin \theta) / J_0(ka \sin \theta)], \quad (4)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; k – волновое число свободного пространства; a – радиус спирали.

Тогда, зная, что $y_0(\theta) = [\beta \alpha - ka \cos \theta] \operatorname{tg} \alpha$, из (3) получим следующее:

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, \varphi) &\approx \frac{kL_z(1 - \cos \theta)}{2} + \varphi + \Phi_0; \\ \Phi(\theta, \varphi) &\approx \frac{kL_z(1 - \cos \theta)}{2} + \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где L_z – осевая длина излучателя.

Выражение (5) описывает изменение фазы поля на сфере с центром в начале координат, что фактически является точкой возбуждения излучателя. Следуя вышеизложенному выводу, получается, что $\Phi(\theta, \varphi)$ показывает зависимость начальной фазы тока на входе спирали от направления на источник электромагнитного поля. Выражение (5) позволяет проанализировать зависимость фазы на входе спирали от углов θ, φ от геометрических параметров спирали и длины волны.

Коэффициент направленного действия для целого числа витков N можно представить следующим выражением [4]:

$$D = \frac{8[y_0^2(0) + 1] \sin^2[\pi N y_0(0)] \operatorname{katg} \alpha}{[y_0^2(0) - 1]^2 J_0^2(ka \sin 60^\circ) [y_0^2(60^\circ) + 0,25] B \pi N}, \quad (6)$$

где $B = \left\{ \operatorname{Si} \left[2\pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] - \sin^2 \left[\pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] / \pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right\}$; $x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) = y_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) - 1$.

Входное сопротивление для целого количества N описывается выражением

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{240(kr)^2 \sin^2[\pi N y_0(0)] \left(\frac{J_0}{J_{\text{вх}}} \right)^2}{D [y_0^2(0) - 1]^2}, \quad (7)$$

Для получения результирующей ДН применим следующий прием. Представим данный излучатель в виде плоской прямолинейной эквидистантной равноамплитудной АР, так как используются четыре идентичных спиральных излучателя на одинаковом расстоянии друг от друга. Таким образом, с помощью теоремы перемножения и используя соответствующий множитель АР, получим искомую диаграмму направленности

$$F(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) f_c(\theta, \varphi), \quad (8)$$

где $f_1(\theta, \varphi)$ – результирующая ДН одного излучателя; $f_c(\theta, \varphi)$ – множитель АР.

Векторная ДН излучателя имеет вид

$$f_1(\theta, \varphi) = J_0(ka \sin \theta) \cos \theta. \quad (9)$$

Для определения множителя АР примем N_x и N_y за число излучателей в столбцах и рядах соответственно; D_x и D_y за расстояние между соседними излучателями соответственно по осям OX и OY ; θ_x и θ_y являются углами, отсчитываемыми от точки наблюдения от осей OX и OY соответственно. Затем примем каждый столбец излучателей за линейную АР, множитель которой можно записать в виде

$$F_{Cx}(\theta_x) = \frac{\sin \left[\frac{N_x}{2} (kd_x \cos \theta_x - \alpha_x) \right]}{N_x \sin \left[\frac{1}{2} (kd_x \cos \theta_x - \alpha_x) \right]}. \quad (10)$$

В таком случае, проведя эквивалентную замену каждого столбца плоской АР на излучатель с собственной ДН, получим линейную АР, которая будет ориентирована вдоль оси OY . Затем, воспользовавшись теоремой о перемножении ДН, имеем

$$F_C(\theta_x, \theta_y) = F_O(\theta_x) F_{Cy}(\theta_y), \quad (11)$$

где $F_O(\theta_x)$ – ДН излучателя; $F_{Cy}(\theta_y)$ – множитель АР, состоящей из излучателей. В таком случае $F_{Cy}(\theta_y)$ имеет вид

$$F_{Cy}(\theta_y) = \frac{\sin \left[\frac{N_y}{2} (kd_y \cos \theta_y - \alpha_y) \right]}{N_y \sin \left[\frac{1}{2} (kd_y \cos \theta_y - \alpha_y) \right]}. \quad (12)$$

Далее введем обозначение обобщенных угловых координат:

$$U_x = kd_x \cos \theta_x - \alpha_x; \quad U_y = kd_y \cos \theta_y - \alpha_y. \quad (13)$$

Подставив (13) в (10) и (12), определим множитель плоской АР

$$F_C(U_x, U_y) = \frac{\sin \left(\frac{N_x}{2} U_x \right) \sin \left(\frac{N_y}{2} U_y \right)}{N_x \sin \left(\frac{1}{2} U_x \right) N_y \sin \left(\frac{1}{2} U_y \right)}. \quad (14)$$

Однако необходимо учитывать то, что множитель АР в сферической системе координат не является функцией углов θ_x и θ_y . В таком случае необходимо определить связь между углами θ_x и θ_y ; θ и φ . Если учесть, что $\cos\theta_x$ и $\cos\theta_y$ являются проекциями единичного вектора $\vec{e}_0$, который ориентирован в направлении осей OX и OY , то получим

$$e_x^0 = \sin\theta_x; e_y^0 = \sin\theta_y. \quad (15)$$

Учитывая взаимосвязь между сферической и прямоугольной системами координат, можно выразить проекции единичного вектора $\vec{e}_0$ через углы θ и φ :

$$e_x^0 = \sin\theta \cos\varphi; e_y^0 = \sin\theta \sin\varphi. \quad (16)$$

Получим выражение для множителя АР в сферической системе координат

$$F_C(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x)\right)} \frac{\sin\left(\frac{N_y}{2} k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y\right)}{N_y \sin\left(\frac{1}{2}(k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y)\right)}. \quad (17)$$

Определив множитель АР и подставив выражения (16) и (17) в выражение (8), получаем результирующую диаграмму направленности квадрифилярного спирального излучателя [5, 6]

$$F(\theta, \varphi) = (J_0(ka \sin\theta) \cos\theta) \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(k d_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x)\right)} \frac{\sin\left(\frac{N_y}{2} k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y\right)}{N_y \sin\left(\frac{1}{2}(k d_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y)\right)}. \quad (18)$$

Полученная ДН для данного излучателя позволяет судить о достаточной линейности его основных электродинамических характеристик. Для получения основных характеристик данной излучающей структуры будем использовать метод, который основан на построении феноменологических моделей. Он позволяет достаточно оперативно определить параметры вновь синтезируемой антенной структуры и провести анализ ее характеристик, дает возможность синтезировать сложные антенные системы и комплексы без использования методов натурального моделирования и построения физических моделей, так как данный подход показывает максимально приближенные к реальной физической модели результаты, в которых расхождение с физической моделью составляет менее 5 %. В свою очередь, благодаря использованию предлагаемого метода, можно оперативно синтезировать антенные структуры, которые будут иметь хорошую повторяемость и линейность электродинамических характеристик при трансформации феноменологических моделей в физические. На основе вышеизложенного подхода будет синтезирована и АР для комплекса метеорологического обеспечения [7].

Для более вариативной выборки синтезировано несколько моделей квадрифилярных излучателей.

Используя выражения (1) – (18), построим феноменологическую модель в программном продукте электродинамического моделирования [8] (рис. 2).

Построим основные электродинамические характеристики данного излучателя: ДН в полярной и декартовой системе координат, коэффициент усиления (**КУ**), коэффициент отражения (**КО**), коэффициент стоячей волны (**КСВ**), волновое сопротивление (рис. 3 – 5).

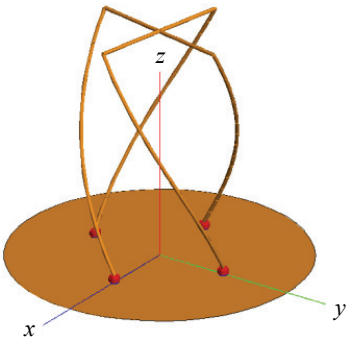


Рис. 2. 3D-модель замкнутой четвертьволновой КСА в программной среде Altair FEKO

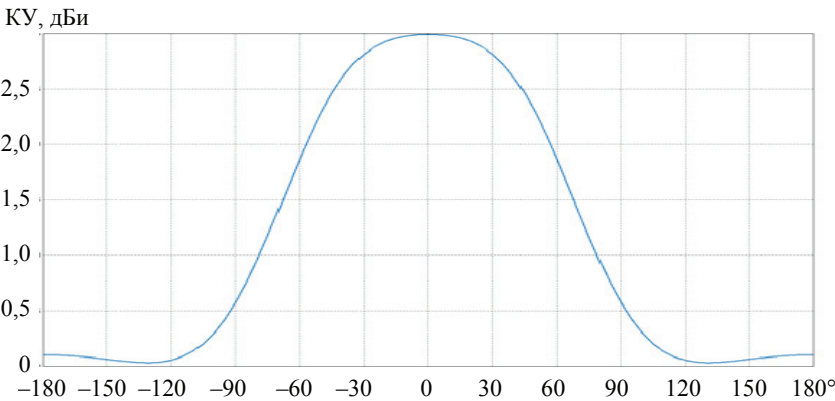


Рис. 3. Диаграмма направленности замкнутой четвертьволновой КСА в декартовой системе координат

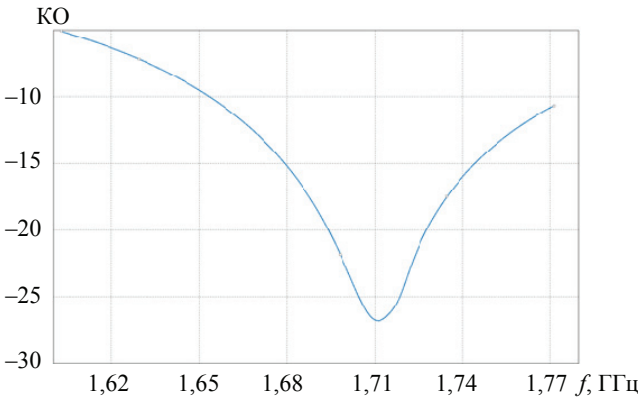


Рис. 4. Коэффициент отражения замкнутой четвертьволновой КСА

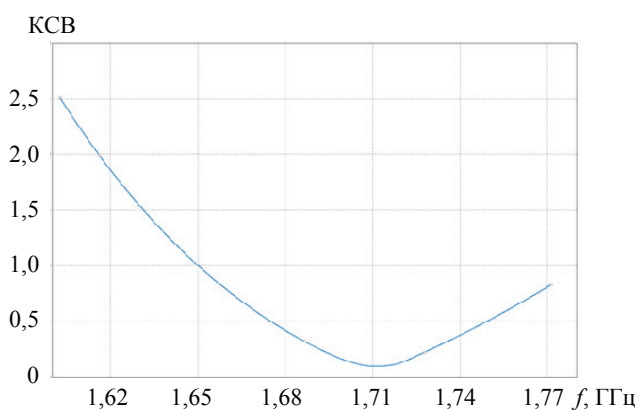


Рис. 5. Коэффициент стоячей волны замкнутой четвертьволновой КСА

Рассмотрим другой тип излучателя, 3D-модель которого представлена в виде разомкнутой КСА (рис. 6). Для данного типа излучателя основные характеристики приведены на рис. 7, 8.

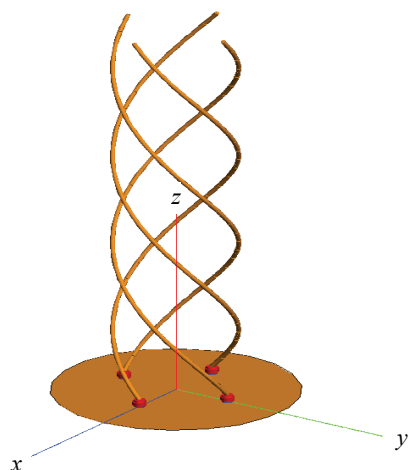


Рис. 6. 3D-модель разомкнутой КСА

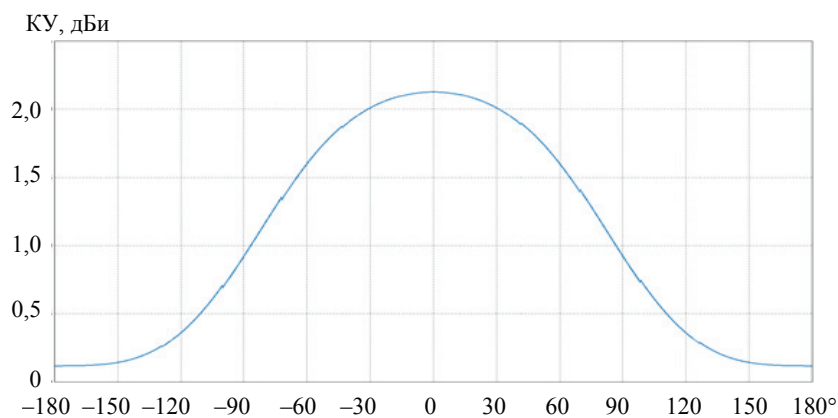


Рис. 7. Диаграмма направленности КСА в декартовой системе координат

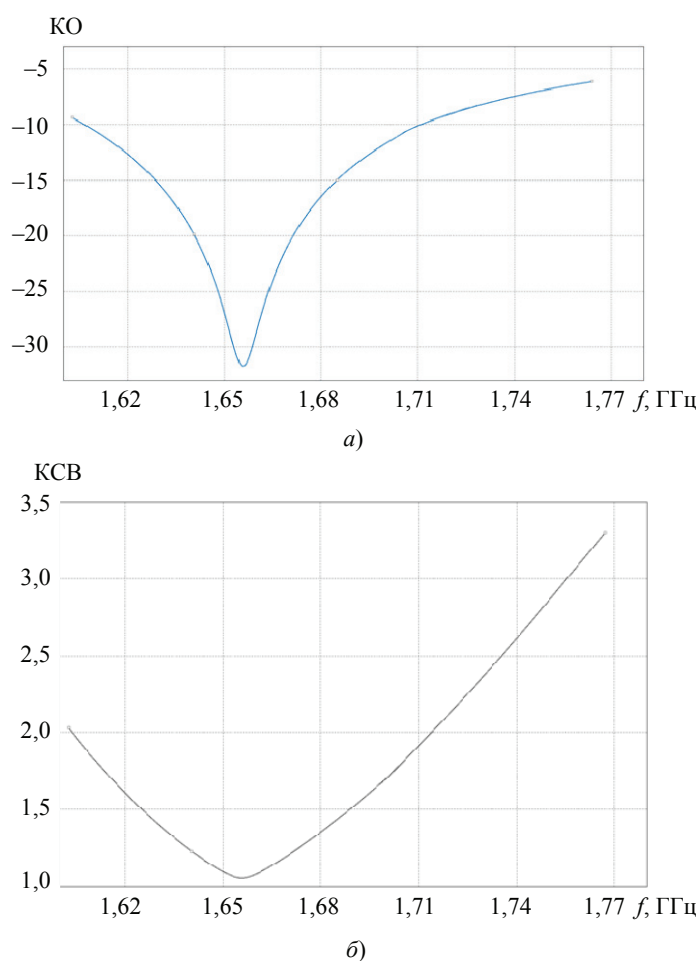


Рис. 8. Коэффициенты отражения (а) и стоячей волны (б) разомкнутой КСА

Сравнив показатели электродинамических характеристик (на центральной частоте) смоделированных излучателей, отметим, что оба имеют хорошую направленность, обладают симметрией поворота и являются взаимными, так как не содержат невзаимных сред, имеют достаточно выраженный главный лепесток, с практически отсутствующими боковыми лепестками (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение электродинамических характеристик КСА

Показатель	КСА	
	замкнутая	разомкнутая
Коэффициенты:		
усиления, дБи	3	2,8
стоячей волны	1,4	1,7
отражения, дБ	-20	-15
Волновое сопротивление, Ом	40	50

Результаты проведенного синтеза замедляющих электродинамических структур, таких как квадрифилярные замкнутая и разомкнутая антенны, могут использоваться в качестве элементов интеллектуальной фазированной АР [9, 10].

Использование рассмотренных типов излучателей позволит существенным образом минимизировать такие отрицательные показатели, как малое количество ведения радиозондов, небольшая дальность сопровождения зонда и невозможность быстрого управления лучом, и расширить функциональные возможности систем температурно-ветрового радиозондирования атмосферы при аэрологических наблюдениях.

Список литературы

1. Обеспечить научное сопровождение промышленного производства и ввода в эксплуатацию нового аэрологического комплекса МАРЛ-А. – Текст : электронный / А. В. Кочин, А. С. Азаров, А. С. Дубовецкий, Р. В. Лесков // Отчет о научно-исследовательской работе – 2004. – 35 с. – URL : http://cao-ntcr.mipt.ru/MARL_comp1.htm (дата обращения 18.01.2021).
2. Синтез цилиндрической фазированной антенной решетки на основе логопериодических вибраторных антенн для систем широкополосного доступа стандарта IEEE802.11, IEEE802.16 / О. А. Белоусов, Р. Ю. Курносов, П. А. Горшков, А. Г. Рязанова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 266 – 272. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.266-272
3. Юрцев, О. А. Спиральные антенны / О. А. Юрцев, А. В. Рунов, А. Н. Казарин. – М. : Сов. радио, 1974. – 224 с.
4. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учеб. пособие / Под ред. Д. И. Воскресенский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2012. – 744 с.
5. Антенны : учеб. пособие / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов [и др.]. – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2020. – 412 с.
6. Фрадин, А. З. Антенно-фидерные устройства / А. З. Фрадин. – М. : Связь, 1977. – 440 с.
7. A Broadband Folded Printed Quadrifilar Helical Antenna Employing a Novel Compact Planar Feeding Circuit / M. Caillet, M. Clnet, A. Sharaiha, Y. M. M. Antar // Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, No. 7. – P. 2203 – 2209.
8. Printed Quadrifilar Helix Antenna with Integrated Feed Network / F. Shiqiang, F. Shao-jun, L. Kai, W. Zhong-bao // Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications : Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium, 27 – 29 October 2009, Beijing, China. – IEEE, 2009. – P. 67 – 69.
9. Shcherbyna, O. Quadrifilar Helical Antennas with Different Types of Supply Lines / O. Shcherbyna, O. Tomai, O. Kozhokhina // Proceedings of the Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2018), 15–16 November 2018, Riga, Latvia. – IEEE, 2018. – P. 167 – 170.
10. Letestu, Y. Multiband Printed Quadrifilar Helical Antenna / Y. Letestu, A. Sharaiha // Electronics Letters. – 2010. – Vol. 46, Issue 13. – P. 885–886.

Synthesis of a Square Radiator for Aerological Sensing Radar Stations

M. A. Kudryashov, O. A. Belousov, A. Yu. Dmitriyev, M. M. Kiryupin

*Department of Design of radio-electronic and microprocessor systems,
maximkudryashov969@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: aerological locator; aerological sounding; quadrifilar helical antenna; radar station; phenomenological model.

Abstract: The main aspects of the synthesis of a quadrifilar radiator are considered. The choice of the emitter is explained and its mathematical model is presented. The application of the method of phenomenological models has been substantiated. Computer simulation of two models of a quadrifilar radiator in the complex of electrodynamic modeling is carried out and the resulting electrodynamic characteristics are given. A comparison of two phenomenological models is given and their application as part of an antenna array used in complexes of aerological radio monitoring stations is grounded.

References

1. http://cao-ntcr.mipt.ru/MARL_comp1.htm (accessed 18 January 2021).
2. Belousov O.A., Kurnosov R.Yu., Gorshkov P.A., Ryazanova A.G. [Synthesis of a cylindrical phased antenna array based on logo-periodic dipole antennas for broadband access systems of the IEE802.11, IEE802.16 standards], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 266-272, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.266-272 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Yurtsev O.A., Runov A.V., Kazarin A.N. *Spiral'nyye antennoy* [Spiral antennas], Moscow: Sovetskoye radio, 1974, 224 p. (In Russ.)
4. Voskresenskiy D.I. [Ed.] *Ustroystva SVCH i antennoy. Proyektirovaniye fazirovannykh antennoykh reshetok: uchebnoye posobiye* [Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays: textbook], Moscow: Radiotekhnika, 2012, 744 p. (In Russ.)
5. Zyryanov Yu.T., Fedyunin P.A., Belousov O.A. [et al.] *Antennoy: uchebnoye posobiye* [Antennas: a tutorial], St. Petersburg: Lan', 2020, 412 p. (In Russ.)
6. Fradin A.Z. *Antenno-fidernyye ustroystva* [Antenna-feeder devices], Moscow: Svyaz', 1977, 440 p. (In Russ.)
7. Caillet M., Clnet M., Sharaiha A., Antar Y.M.M. A Broadband Folded Printed Quadrifilar Helical Antenna Employing a Novel Compact Planar Feeding Circuit, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2203-2209.
8. Shiqiang F., Shao-jun F., Kai L., Zhong-bao W. Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium, 27 - 29 October, 2009, Beijing, China, IEEE, 2009, pp. 67-69.
9. Shcherbyna O., Tomai O., Kozhokhina O. Quadrifilar Helical Antennas with Different Types of Supply Lines, Proceedings of the Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2018), 15-16 November, 2018, Riga, Latvia, IEEE, 2018, pp. 167-170.
10. Letestu Y., Sharaiha A. Multiband Printed Quadrifilar Helical Antenna, *Electronics Letters*, 2010, vol. 46, issue 13, pp. 885-886.

Synthese des quadrifilaren Strahlers für Radarstationen der aerologischen Sondierung

Zusammenfassung: Es sind die Hauptaspekte der Synthese eines Quadrifilar-senders betrachtet. Die Wahl des Senders ist argumentiert und sein mathematisches Modell ist vorgestellt. Die Anwendung der Methode phänomenologischer Modelle ist begründet. Es ist die Computersimulation von zwei Modellen des quadrifilaren Strahlers im Komplex der elektrodynamischen Modellierung durchgeführt und die daraus

resultierenden elektrodynamischen Charakteristiken sind gegeben. Es ist der Vergleich zweier phänomenologischer Modelle gegeben und ihre Anwendung als Teil eines Antennenarrays motiviert, das in Komplexen aerologischer Funkmessstationen verwendet wird.

Synthèse d'un émetteur quadrifilaire pour les stations radar de la détection aérologique

Résumé: Sont examinés les principaux aspects de la synthèse de l'émetteur quadrifilaire. Est argumenté le choix de l'émetteur; est présenté son modèle mathématique. Est justifiée l'application de la méthode des modèles phénoménologiques. Sont présentés deux modèles de radiateurs quadrifilaires dans le complexe de la simulation électrodynamique; sont citées les caractéristiques électrodynamiques obtenues. Est donnée la comparaison de deux modèles phénoménologiques; est motivée leur application dans le réseau d'antennes utilisé dans les complexes des stations de radiomonte aérologique.

Авторы: *Кудряшов Максим Артурович* – магистрант; *Белоусов Олег Андреевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Дмитриевцев Андрей Юрьевич* – магистрант; *Кирюпин Михаил Михайлович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

СИСТЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ДАННЫХ ОБ ОКАЗАНИИ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ НАСЕЛЕНИЮ

С. Л. Блюмин, Р. В. Щеглевых, А. А. Найденов, А. С. Сысоев

*Кафедра прикладной математики, sysoev_as@stu.lipetsk.ru;
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
г. Липецк, Россия*

Ключевые слова: анализ конечных изменений; анализ чувствительности; аномальные наблюдения; классификация; математическое моделирование; поиск аномалий.

Аннотация: Дано описание математической модели нейросетевого классификатора данных о фактах оказания медицинской помощи в учреждениях Липецкой области в целях выявления нетипичных (аномальных) записей. Выявление аномалий относится к проблеме нахождения данных, не соответствующих некоторому ожидаемому поведению процесса или показателю, возникающему в системе. Из-за большого количества входов нейросетевой модели возрастает и время, которое требуется для обработки поступающей информации. Для оценки того, какие факторы должны быть переданы на вход нейросетевого классификатора, предложен подход к редукции нейросетевой модели, основанный на анализе чувствительности. Представлено описание комплекса программных средств для решения поставленной задачи.

Введение

Широкое внедрение информационных технологий во все сферы жизни человека приводит к упрощению рутинных операций, сокращению числа возникающих технических ошибок, облегчению доступа к необходимой информации, и, следовательно, повышению качества жизни. Бурно развивающиеся системы искусственного интеллекта способны анализировать информацию, поступающую в режиме реального времени, находить закономерности в имеющихся данных, а также выдавать рекомендации по управлению системой или процессом.

Известны применения интеллектуальных систем для анализа медицинской информации, особое место среди которых занимают экспертные медицинские системы, способные на основании анализа ретроспективной информации и выработки определенных онтологических правил построить предположение относительно диагностируемого у пациента заболевания и определить приемлемый вариант лечения [1 – 4]. Например, в исследовании [3] приведен подход к синтезу нечетких решающих правил для оценки и прогнозирования состояния пациента при различных типах заболеваний. Актуальными также являются задачи анализа рентгенологических снимков, снимков компьютерной и магнитно-резонансной томографий для анализа состояния больного и поиска аномалий в тканях [5 – 9]. Данные разработки особенно популярны, так как вплоть до настоящего времени

для гарантированной постановки диагноза необходимо было прибегать к не всегда возможному и порой опасному исследованию, такому как биопсия тканей пациента. Системы сегментации и распознавания изображений способны снять необходимость проведения таких процедур.

Актуальной является задача исследования статистической медицинской информации, в частности информации об оказании медицинской помощи населению [10, 11]. Несмотря на принятый в России «ГОСТ Р 52636–2006 Электронная история болезни. Общие положения», каждое медицинское лечебное учреждение разрабатывает системы, адаптированные для своих нужд. Однако хранимые в таких системах данные удовлетворяют положениям Международного стандарта электронных историй болезни ISO 13606 и могут быть использованы для анализа качества услуг, оказываемых лечебными учреждениями населению. Одной из возникающих в этой сфере проблем является поиск аномальных записей в статистической информационной системе электронных историй болезни [12]. Такие записи могут трактоваться как ошибочные или рассматриваться как фальсификация результатов в целях получения прибыли в рамках программ страховой медицины. Экспертами фонда обязательного медицинского страхования проводятся регулярные выборочные проверки предоставляемых данных, однако, проверка в автоматическом режиме с использованием методов искусственного интеллекта позволит ускорить данный процесс и сократить издержки на обеспечение экспертизы.

Цель исследования – представить разработанные модели, методы, а также программные реализации системы выявления аномальных наблюдений в данных об оказании медицинской помощи населению.

Задача нейросетевой классификации

Рассматриваемая проблема представляет собой задачу нахождения аномальных наблюдений в массивах данных. Решению схожих проблем посвящено достаточное количество работ. В зависимости от специфики организации данных и типа их аномальности могут быть применены различные подходы [13 – 16]. Рассматривается массив данных, состоящий из реализаций n объектов, каждый из которых описывается m -мерным вектором признаков $X = (X_1, \dots, X_m)$ и принадлежит к одному из двух классов: K_1 – нормальные наблюдения, K_2 – аномальные. Множество показателей X объектов классов K_1 и K_2 является обучающей выборкой.

Ставится задача для каждого нового наблюдения $x = (x_1, \dots, x_m)$ вектора признаков с учетом совершения некоторой ошибки второго рода (возможность того, что доля нормальных наблюдений будет отнесена к аномальным) определить класс объекта K_i , $i = 1, 2$, к которому его следует отнести, то есть нужно построить решающее правило (с учетом ошибки первого рода) $h(x): X \rightarrow \{d_1, d_2\}$, где $h(s) = d_1 \Leftrightarrow s \in K_1$.

Для того чтобы отнести новое наблюдение к одному из возможных классов, определим дискриминантную пороговую функцию $t(x): X \rightarrow R$. Тогда классификатор примет вид

$$h^\lambda(x) = \begin{cases} d_1, & t(x) \geq \lambda, \\ d_2, & t(x) < \lambda. \end{cases} \quad (1)$$

В заданном решающем правиле (1) в качестве функции $t(x)$ для решения поставленной задачи используется выходное значение нейросетевой модели.

В проведенном исследовании качество классификации оценивалось на основе точности и полноты, а также комбинаций указанных характеристик [17]. Точность классификации $P(h)$ определяется как доля объектов, которые были рас-

познаны как объекты класса аномальных наблюдений. Полнота классификации $R(h)$ показывает, какая доля объектов, реально относящаяся к классу аномальных наблюдений, была предсказана; их среднее гармоническое (F -мера) [18] определяется по формуле

$$F(h) = \frac{2P(h)R(h)}{P(h) + R(h)}. \quad (2)$$

Рассматриваемая задача относится к классу задач бинарной классификации, одним из способов оценки порога разделения для которых является использование кривых ошибок (или ROC-кривых) – графиков зависимости полноты классификации $R(h)$ от величины специфичности по всем возможным значениям порога разделения λ [19].

Для обнаружения аномалий могут использоваться алгоритмы, основанные на методах классификации, в которых в качестве инструментов применяются деревья решений, модели нечеткой логики, наивные байесовские модели, генетические алгоритмы, нейронные сети, опорные векторы и др. [20]. Для повышения точности обнаружения аномальных наблюдений предложены также комбинированные методы, объединяющие в себе преимущества нескольких алгоритмов. К таким комбинациям относятся каскадные методы классификации с обучением (комбинация наивных байесовских моделей и деревьев решений, деревьев решений и метода опорных векторов) и комбинации схем классификации с обучением и без него (например, модификации методов опорных векторов и метод кластеризации k -средних (*англ.* k -means)). Данные методы предполагают, что в результате анализа будет получена модель, описывающая профиль «нормального» наблюдения. Однако существует и принципиально иной подход, основанный на построении модели, выявляющей значения, отличающиеся от всех тех, которые характерны для показателей рассматриваемой системы или процесса. Структура, лежащая в основе работы такого метода, – изолирующий лес. Изоляция в этом смысле означает отделение одной группы наблюдений от другой. Чтобы применить эту идею к каждому наблюдению, необходимо рассчитать некоторую меру восприимчивости, определяющую порог разделения. Естественными структурами, разделяющими данные, являются случайно сгенерированные двоичные деревья, образцы которых рекурсивно разделяются [21, 22]. Метод имеет много преимуществ и хорошо справляется с обнаружением аномалий, в частности, он чувствителен к появлению контекстных аномалий, которые можно интерпретировать как технические ошибки фиксации данных или их намеренное искажение. Для обеспечения такого обнаружения необходимо построить массивы «нормальных» и аномальных реализаций, которые в дальнейшем будут анализироваться специалистами. Для повышения качества обнаружения аномалий [23] предлагается на первом этапе использовать изолирующий лес для фильтрации данных (формирования групп «нормальных» и аномальных наблюдений), затем анализировать все аномалии и выделять среди них контекстные (наблюдения, которые принципиально возможны, но не типичны по сравнению с соседними данными), а затем, применяя нейросетевой классификатор, строить модель, способную находить выбросы для новых исходных данных:

$$Y^{(n)} = \Psi^{(n)} \Psi^{(n-1)} \dots \Psi^{(1)} X, \quad (3)$$

где $Y^{(n)}$ – выход n -слойной нейронной сети (значение, характеризующее принадлежность наблюдения к множеству выбросов); X – вектор входных факторов, $\Psi^{(1)}, \Psi^{(2)}, \dots, \Psi^{(n)}$ – функции активации слоев нейронной сети.

Задача редукции нейросетевой модели

Следует отметить, что при большом количестве входов в нейронную сеть (3), такой подход является затратным с точки зрения использования вычислительных ресурсов.

Ранее синтезирован алгоритм анализа чувствительности модели по факторам, позволяющий провести редукцию нейросетевой модели с минимальным понижением ее точности [24]. В основу подхода положены методы анализа конечных изменений с применением теоремы Лагранжа о промежуточной точке. В качестве мер чувствительности выхода нейронной сети на изменения ее входов используются так называемые факторные нагрузки A_{x_i} , которые вычисляются из модели

$$\Delta Y^{(n)} = \sum_{i=1}^d \frac{\partial Y^{(n)}}{\partial x_i} \left(\dots, x_i^{(0)} + \alpha \Delta x_i, \dots \right) \Delta x_i = A_{x_1} \Delta x_1 + \dots + A_{x_d} \Delta x_d. \quad (5)$$

Полученные результаты нагрузок (5) усредняются, и на основе их анализа принимается решение о сокращении числа входов модели.

Процедура вычисления факторных нагрузок по модели (5) проводится столько раз, сколько существует конечных приращений в анализируемом наборе данных. Таким образом, возникает задача нахождения устойчивой к выбросам оценки среднего значения. В качестве такой оценки предлагается использовать взвешенное среднее Тьюки, алгоритм построения которого носит итерационный характер и включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Вычислить среднее значение выборки (в качестве начального приближения используется медиана).

Шаг 2. Определить расстояния от вычисленного среднего на шаге 1 до каждого элемента выборки. В соответствии с этими расстояниями элементам выборки присваиваются различные веса, с учетом которых среднее значение пересчитывается.

Пусть $A_{x_i} = \{A_{x_i}^1, \dots, A_{x_i}^n\}$ – выборка из рассчитанных факторных нагрузок для входа x_i ; $M_{A_{x_i}}$ – медиана выборки A_{x_i} ; S – медиана выборки $\{|A_{x_i}^1 - M_{A_{x_i}}|, \dots, |A_{x_i}^n - M_{A_{x_i}}|\}$ (абсолютное отклонение среднего). Для каждого элемента $A_{x_i}^k$ ($k = 1, \dots, n$) выборки A_{x_i} вычисляется отклонение от среднего

$$u_k = \frac{A_{x_i}^k - M_{A_{x_i}}}{cS + \xi},$$

где c – параметр, определяющий, насколько оценка чувствительна к выбросам; ξ – малая величина, основное назначение которой – исключить возможность деления на ноль.

Для нахождения веса каждого наблюдения выборки используется биквадратная функция вида

$$w(u) = \begin{cases} (1 - u^2)^2, & |u| \leq 1, \\ 0, & |u| > 1. \end{cases}$$

Оценка взвешенного Тьюки

$$T_{A_{x_i}} = \frac{\sum_{k=1}^n w(u_k) A_{x_i}}{\sum_{k=1}^n w(u_k)}.$$

Помимо точечной оценки среднего находят интервал для построения величины при помощи приближения распределением Стьюдента.

Симметричный доверительный интервал уровня $(1 - \alpha)$, %, задается формулой

$$T_{A_{x_i}} \pm t_{df}^{(1-\alpha/2)} \frac{S_{A_{x_i}}}{\sqrt{n}};$$

$$S_{A_{x_i}} = \sqrt{n} \frac{\sqrt{\sum_{|u_k| \leq 1} (A_{x_i}^k - T_{x_i})^2 (1 - u_k^2)^4}}{\left| \sum_{|u_k| \leq 1} (1 - u_k^2) (1 - 5u_k^2) \right|},$$

где $t_{df}^{(1-\alpha/2)} - (1 - \alpha / 2)$ – квантиль распределения Стьюдента с числом степеней свободы $df = \max(0, 7(n - 1), 1)$.

Схема описываемой системы представлена на рис. 1. Вначале данные, полученные из информационной системы, подвергаются преобразованию в необходимый формат. Затем полученные данные обрабатываются при помощи алгоритма изолирующего леса в целях вычисления показателя аномальности для каждой реализации. Набор входов модели дополняется полученными результатами. Среди существующих алгоритмов оценки аномальности наблюдения выбор конкретного алгоритма объясняется, во-первых, большей эффективностью изолирующего дерева, по сравнению с большинством подходов; во-вторых, отсутствием параметров настройки. Построенная модель с дополнительным входом в свою очередь подвергается анализу чувствительности по входам для последующей редукции. По выбранным наиболее значимым входам происходит структурная и параметрическая идентификация новой нейросетевой модели классификатора с сокращенным числом входных переменных. На последнем этапе проводится выявление аномальных записей в новых массивах данных об оказании медицинской помощи.

Схема информационных потоков между модулями системы представлена на рис. 2, интерфейс разработанного программного обеспечения – рис. 3.

В качестве входных факторов взяты отдельные статистические показатели из информационной системы персонифицированного учета медицинской помощи Липецкого областного фонда обязательного медицинского страхования (Липецкая область, Россия). Период фиксации: 01 – 30 апреля 2018 г. (570 111 случаев). На основе экспертного анализа выбраны показатели, однозначно характеризующие каждый случай оказания медицинской помощи, – 14 различных значений, таких как показатели, однозначно идентифицирующие пациента (например, номер полиса ОМС и возраст), оказание медицинской помощи (например, код, по которому можно определить, какая организация здравоохранения оказывает медицинскую помощь, специализация медицинского персонала, оказавшего анализируемый вид помощи), особенности конкретного случая (например, основной диагноз на первом, втором, третьем этапах госпитализации, дополнительный диагноз, длительность госпитализации) и т.п. Выбранные показатели были поданы на вход алгоритма изолирующего леса, полученные оценки аномальности для каждого наблюдения затем использовали в качестве входного фактора.

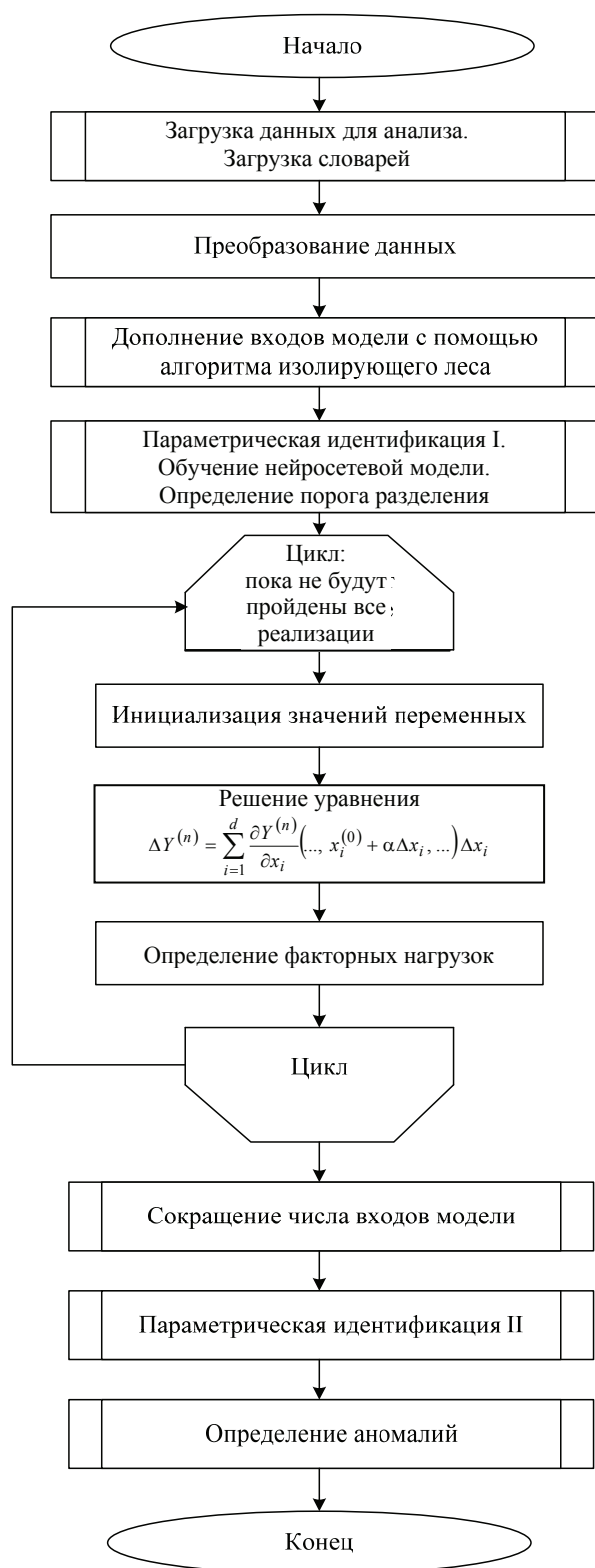


Рис. 1. Схема реализации модели поиска аномальных наблюдений

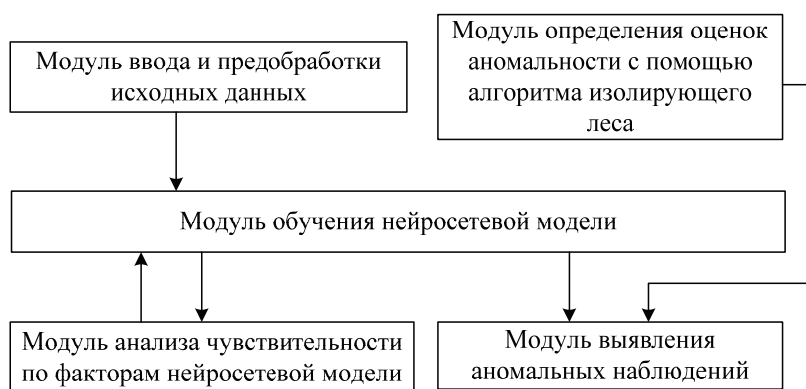


Рис. 2. Схема информационных потоков между модулями системы

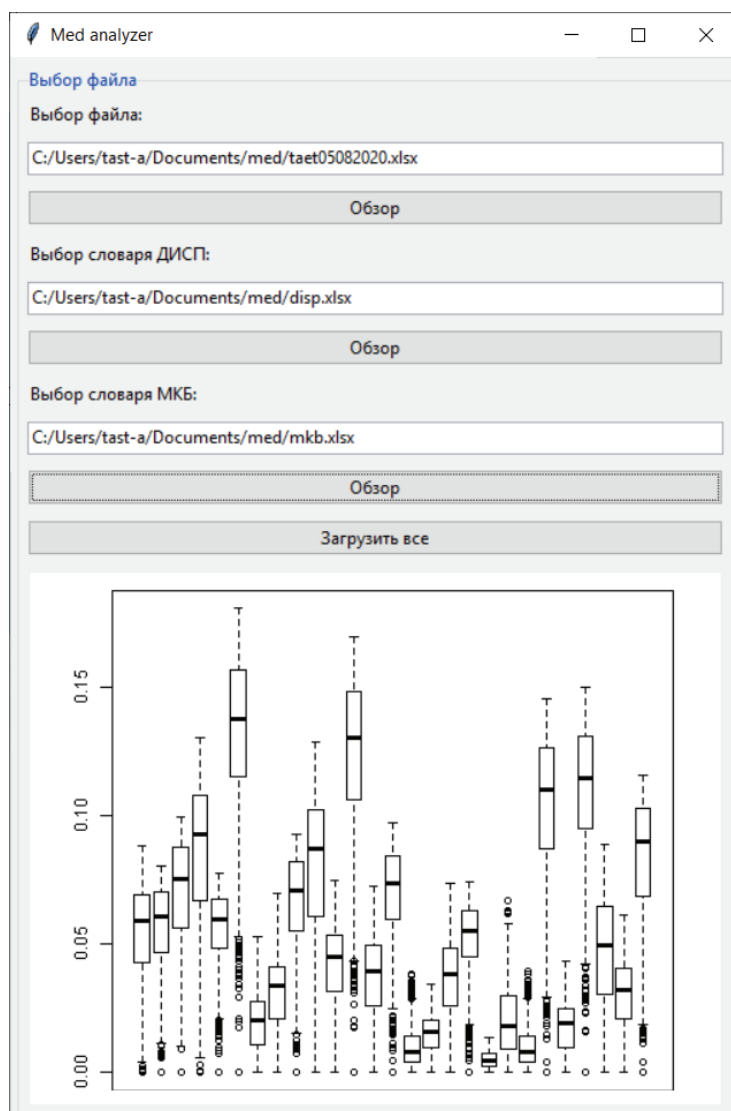


Рис. 3. Интерфейс модуля загрузки и предобработки данных

Вычислительный эксперимент

Была использована нейросетевая модель (3), имеющая структуру

$$y_k = \psi_1 \left(b_0 + \sum_{j=1}^3 w_j \psi_2 \left(b_1 + \sum_{m=1}^{15} w_{jm} x_m \right) \right), \quad (6)$$

где y_k – модельные значения; X – вектор факторов системы; w_j и w_{jm} – весовые коэффициенты; b_0 и b_1 – свободные коэффициенты нейронов выходного и скрытого слоев соответственно; $\psi_1(net) = \psi_2(net) = 1/(1+\exp(-net))$ – логистические функции активации. Точность предсказания моделью (6) аномалий в новом наборе данных составила 92,37 %.

На рисунке 4 представлена гистограмма с результатами анализа чувствительности построенной модели, демонстрирующими значимость входов модели. Отметим, что проведенные ранее исследования показывают непротиворечивость полученных результатов. Но в отличие от известных подходов (например, использование коэффициентов чувствительности Соболя), предложенный подход не основан на аппроксимации статистических параметров исследуемой структуры и, в отличие от стратегии Гарсона (подход, используемый для оценки чувствительности входов нейронных сетей), оперирует как параметрами, так и факторами исследуемой модели.

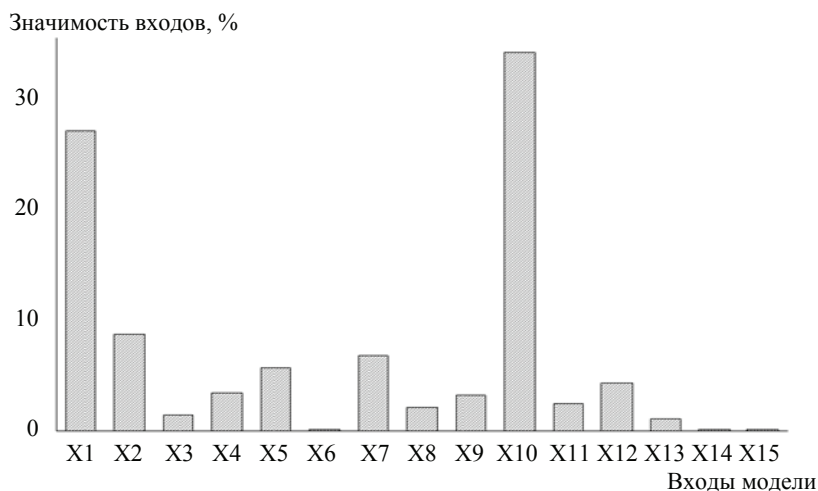


Рис. 4. Результаты анализа чувствительности модели (6)

Заключение

Разработанный программный комплекс реализует предложенные модели и подходы, направленные на решение задачи определения аномальных реализаций в массивах данных об оказании медицинской помощи населению. Актуальность этих проблем подтверждается постоянным увеличением расходов на проведение экспертных проверок в указанной области. Предлагаемая система способна проводить автоматическую проверку поступающей новой информации, а также имеет возможность адаптации к новым условиям функционирования. Открытым остается вопрос определения порогового значения важности входа рассматриваемой модели, однако в каждом конкретном случае данный вопрос решается путем экспертной оценки.

Список литературы

1. Abu-Nasser, B. Medical Expert Systems Survey / B. Abu-Nasser // International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2017. – Vol. 1, Issue 7. – P. 218 – 224.
2. Singla, J. Medical Expert Systems for Diagnosis of Various Diseases / J. Singla, D. Grover, A. Bhandari // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 93, Issue 7. – P. 36 – 43.
3. Корневский, Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем / Н. А. Корневский // Медицинская техника. – 2015. – Т. 49, № 1. – С. 33 – 35.
4. An Expert System for Diabetes Prediction Using Auto Tuned Multi-Layer Perceptron / M. Jahangir, H. Afzal, M. Ahmed [et al.] // Intelligent systems conference (IntelliSys), 7–8 September 2017, London. – IEEE, 2018. – P. 722 – 728.
5. Body-Wide Hierarchical Fuzzy Modeling, Recognition, and Delineation of Anatomy in Medical Images / J. K. Udupa, D. Odhner, L. Zhao [et al.] // Medical Image Analysis. – 2014. – Vol. 18, Issue 5. – P. 752 – 771.
6. Xue, W. Text Detection and Recognition for Images of Medical Laboratory Reports with a Deep Learning Approach / W. Xue, Q. Li, Q. Xue // IEEE Access. – 2019. – Vol. 8. – P. 407 – 416.
7. Active Deep Neural Network Features Selection for Segmentation and Recognition of Brain Tumors Using MRI Images / M. I. Sharif, J. P. Li, M. A. Khan, M. A. Saleem // Pattern Recognition Letters. – 2020. – Vol. 129. – P. 181 – 189.
8. Доронищева, А. В. Методы распознавания медицинских изображений для задач компьютерной автоматизированной диагностики. – Текст : электронный / А. В. Доронищева, С. З. Савин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22285960_75182931.pdf (дата обращения: 24.08.2021).
9. Parks, C. L. Automated Facial Recognition of Computed Tomography-Derived Facial Images: Patient Privacy Implications / C. L. Parks, K. L. Monson // Journal of Digital Imaging. – 2017. – Vol. 30, Issue 2. – P. 204 – 214.
10. Марухина, О. В. Применение методов Data Mining для выявления скрытых закономерностей в задачах анализа медицинских данных / О. В. Марухина, Е. Е. Мокина, Е. В. Берестнева // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 4. – С. 107 – 113.
11. Минжасова, А. И. Статистический анализ медицинских данных / А. И. Минжасова // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2015. – № 2. – С. 193 – 198.
12. Щеглевых, Р. В. Исследование нейросетевой модели обнаружения аномальных наблюдений в массивах данных / Р. В. Щеглевых, А. С. Сысоев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2021. – № 1. – С. 23 – 40. doi: 10.15593/2499-9873/2021.1.02
13. Agrawal, Sh. Survey on Anomaly Detection using Data Mining Techniques / Sh. Agrawal, J. Agrawal // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 60. – P. 708 – 713.
14. Amor, N. B. Naive Bayes vs Decision Trees in Intrusion Detection Systems / N. B. Amor, S. Benferhat, Z. Elouedi // Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, 14 – 17 March 2004, Nicosia, Cyprus. – IEEE, 2004. – P. 420 – 424.
15. Kaur, N. Survey Paper on Data Mining Techniques of Intrusion Detection / N. Kaur // International Journal of Science, Engineering and Technology Research. – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – P. 799 – 804.
16. Survey of Fraud Detection Techniques / Y. Kou, C. T. Lu, S. Sirwongwattana, Y. P. Huang // Proceedings of the IEEE International Conference Networking, Sensing and Control, 21 – 23 March 2004, Taipei, Taiwan. – IEEE, 2004. – Vol. 2. – P. 749 – 754.

17. Bramer, M. Estimating the Predictive Accuracy of a Classifier / M. Bramer // *Principles of Data Mining*. – London : Springer-Verlag London, 2020. – P. 79 – 92.
18. Sawade, C. Active Estimation of F-Measures / C. Sawade, N. Landwehr, T. Scheffer // *Advances in Neural Information Processing Systems : 24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, Proceedings of a meeting held 6 – 9 December 2010, Vancouver, British Columbia, Canada*. – Curran Associates, Inc., 2010. – Vol. 2. – P. 2083 – 2091.
19. Obuchowski, N. A. Nonparametric Analysis of Clustered ROC Curve Data / N. A. Obuchowski // *Biometrics*. – 1997. – Vol. 53, No. 2. – P. 567 – 578.
20. Parmar, J. D. Anomaly Detection in Data Mining: A Review / J. D. Parmar, J. T. Patel // *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. – 2017. – Vol. 7, Issue 4. – P. 32 – 40.
21. Liu, F. T. Isolation Forest / F. T. Liu, K. M. Ting, Z. H. Zhou // *2008 Eight IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, 15 – 19 December 2008, Pisa, Italy. – Los Alamitos, 2008. – Art. 10472172. – P. 413 – 422. doi: 10.1109/ICDM.2008.17
22. Liu, F. T. Isolation-Based Anomaly Detection / F. T. Liu, K. M. Ting, Z. H. Zhou // *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*. – 2012. – Vol. 6, Issue 1. – P. 1 – 39. doi: 10.1145/2133360.2133363
23. Щеглевых, Р. В. Математическая модель обнаружения аномальных наблюдений с использованием анализа чувствительности нейронной сети / Р. В. Щеглевых, А. С. Сысоев // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2020. – Т. 8, № 1 (28). – С. 14–15. doi: 0.26102/2310-6018/2020.28
24. Sensitivity Analysis of Neural Network Models: Applying Methods of Analysis of Finite Fluctuations / A. Sysoev, A. Ciurlia, R. Sheglevatykh, S. Blyumin // *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. – 2019. – Vol. 63, Issue 4. – P. 306 – 311. doi: 10.3311/PPee.14654

A System for Detecting Anomalous Observations in Data on Healthcare Services

S. L. Blyumin, R. V. Scheglevatykh, A. A. Naydenov, A. S. Sysoev

*Department of Applied Mathematics, sysoev_as@stu.lipetsk.ru;
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

Keywords: analysis of final changes; sensitivity analysis; abnormal observations; classification; math modeling; search for anomalies.

Abstract: A description of the mathematical model of a neural network classifier of data on healthcare in the institutions of the Lipetsk region is given in order to identify atypical (abnormal) records. Anomaly detection refers to the problem of finding data that is inconsistent with some expected process behavior or metric occurring in the system. Due to the large number of inputs to the neural network model, the time it takes to process the incoming information also increases. To assess what factors should be transmitted to the input of the neural network classifier, an approach to the reduction of the neural network model based on sensitivity analysis is proposed. The description of a set of software tools for solving the problem is presented.

References

1. Abu-Nasser B. Medical Expert Systems Survey, *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 2017, vol. 1, issue 7, pp. 218-224.

2. Singla J., Grover D., Bhandari A. Medical Expert Systems for Diagnosis of Various Diseases, *International Journal of Computer Applications*, 2014, vol. 93, issue 7, pp. 36-43.
3. Korenevskiy N.A. [The use of fuzzy decision-making logic for medical expert systems], *Meditsinskaya tekhnika* [Medical technology], 2015, vol. 49, no. 1, pp. 33-35. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Jahangir M., Afzal H., Ahmed M. [et al.] Intelligent systems conference (IntelliSys), 7-8 September, 2017, London, IEEE, 2018, pp. 722-728.
5. Udupa J.K., Odhner D., Zhao L. [et al.] Body-Wide Hierarchical Fuzzy Modeling, Recognition, and Delineation of Anatomy in Medical Images, *Medical Image Analysis*, 2014, vol. 18, issue 5, pp. 752-771.
6. Xue W., Li Q., Xue Q. Text Detection and Recognition for Images of Medical Laboratory Reports with a Deep Learning Approach, *IEEE Access*, 2019, vol. 8, pp. 407-416.
7. Sharif M.I., Li J.P., Khan M.A., Saleem M.A. Active Deep Neural Network Features Selection for Segmentation and Recognition of Brain Tumors Using MRI Images, *Pattern Recognition Letters*, 2020, vol. 129, pp. 181-189.
8. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22285960_75182931.pdf (accessed 24 August 2021).
9. Parks C.L., Monson K.L. Automated Facial Recognition of Computed Tomography-Derived Facial Images: Patient Privacy Implications, *Journal of Digital Imaging*, 2017, vol. 30, issue 2, pp. 204-214.
10. Marukhina O.V., Mokina Ye.Ye., Berestneva Ye.V. [Application of Data Mining Methods to Reveal Hidden Patterns in the Problems of Medical Data Analysis], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 4, pp. 107-113. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Minzhasova A.I. [Statistical analysis of medical data], *Prikladnaya matematika i fundamental'naya informatika* [Applied mathematics and fundamental informatics], 2015, no. 2, pp. 193-198. (In Russ.)
12. Shcheglevatykh R.V., Sysoyev A.S. [Research of a neural network model for detecting anomalous observations in data arrays], *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied mathematics and control issues], 2021, no. 1, pp. 23-40, doi: 10.15593/2499-9873/2021.1.02 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Agrawal Sh., Agrawal J. Survey on Anomaly Detection using Data Mining Techniques, *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 60, pp. 708-713.
14. Amor N.B., Benferhat S., Elouedi Z. Naive Bayes vs Decision Trees in Intrusion Detection Systems, Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, 14 - 17 March, 2004, Nicosia, Cyprus, IEEE, 2004, pp. 420-424.
15. Kaur N. Survey Paper on Data Mining Techniques of Intrusion Detection, *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2013, vol. 2, issue 4, pp. 799-804.
16. Kou Y., Lu C.T., Sirwongwattana S., Huang Y.P. Survey of Fraud Detection Techniques, Proceedings of the IEEE International Conference Networking, Sensing and Control, 21 - 23 March, 2004, Taipei, Taiwan, IEEE, 2004, vol. 2, pp. 749-754.
17. Bramer M. *Principles of Data Mining*, London: Springer-Verlag London, 2020, pp. 79-92.
18. Sawade C., Landwehr N., Scheffer T. Advances in Neural Information Processing Systems, 24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, Proceedings of a meeting held 6 - 9 December, 2010, Vancouver, British Columbia, Canada, Curran Associates, Inc., 2010, vol. 2, pp. 2083-2091.
19. Obuchowski N.A. Nonparametric Analysis of Clustered ROC Curve Data, *Biometrics*, 1997, vol. 53, no. 2, pp. 567-578.
20. Parmar J.D., Patel J.T. Anomaly Detection in Data Mining: A Review, *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2017, vol. 7, issue 4, pp. 32-40.

21. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. 2008 Eight IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), 15 - 19 December, 2008, Pisa, Italy, Los Alamitos, 2008, art. 10472172, pp. 413-422, doi: 10.1109/ICDM.2008.17

22. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation-Based Anomaly Detection, *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 2012, vol. 6, issue 1, pp. 1-39, doi: 10.1145/2133360.2133363

23. Shcheglevatykh R.V., Sysoyev A.S. [A mathematical model for detecting anomalous observations using sensitivity analysis of a neural network], *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2020, vol. 8, no. 1 (28), pp. 14-15, doi: 0.26102/2310-6018/2020.28 (In Russ., abstract in Eng.)

24. Sysoev A., Ciurlia A., Shcheglevatykh R., Blyumin S. Sensitivity Analysis of Neural Network Models: Applying Methods of Analysis of Finite Fluctuations, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2019, vol. 63, issue 4, pp. 306-311, doi: 10.3311/PPee.14654

Erkennungssystem für anomale Beobachtungen in Daten zur medizinischen Versorgung der Bevölkerung

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung des mathematischen Modells des neuronalen Netzklassifizierers von Daten über die medizinische Versorgung in den Einrichtungen der Region Lipetsk gegeben, um atypische (anormale) Aufzeichnungen zu identifizieren. Die Erkennung von Anomalien bezieht sich auf das Problem, Daten zu finden, die nicht mit einem erwarteten Prozessverhalten oder einer im System auftretenden Metrik übereinstimmen. Aufgrund der großen Anzahl von Eingaben in das neuronale Netzwerkmodell erhöht sich auch die Zeit, die zur Verarbeitung der eingehenden Informationen benötigt wird. Um zu beurteilen, welche Faktoren auf die Eingabe des neuronalen Netzklassifikators übertragen werden sollten, wird ein Ansatz zur Reduktion des neuronalen Netzwerkmodells basierend auf einer Sensitivitätsanalyse vorgeschlagen. Die Beschreibung einer Reihe von Softwarewerkzeugen zur Lösung des Problems ist vorgestellt.

Système de la détection des observations anormales dans les données sur les soins médicaux à la population

Résumé: Est donnée la description du modèle mathématique de la classe neuroréseau des données sur les faits de la prestation des soins médicaux dans les établissements de la région de Lipetsk afin d'identifier les enregistrements atypiques (anormaux). Le phénomène d'anomalie se réfère au problème de la détection des données qui ne correspondent pas à un comportement attendu d'un processus ou à un indicateur qui se produit dans le système. En raison du grand nombre d'entrées du modèle de réseau neuronal, le temps nécessaire pour traiter les informations entrantes augmente également. Pour évaluer les facteurs à transmettre à l'entrée du classificateur de neurones, est proposée une approche pour la réduction du modèle neuroréseau basée sur une analyse de sensibilité. Est présentée une description de l'ensemble des outils logiciels pour résoudre le problème posé.

Авторы: Блюмин Семен Львович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики; Щеглевых Роман Вячеславович – соискатель кафедры прикладной математики; Найденов Антон Александрович – магистрант; Сысоев Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

Рецензент: Фролов Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭКСПЕРТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Д. М. Ненадович, И. В. Маркин

ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», *ilya.markin.92@bk.ru*;
г. Анапа, Краснодарский край, Россия

Ключевые слова: показатель качества; производительность; телекоммуникация; цифровые сети; экспертная система.

Аннотация: Одна из главных целей модернизации телекоммуникационных сетей – повышение ее производительности. Для количественной оценки успешности улучшения системы выполнена разработка методик для оценки экспертных показателей качества производительности проектируемой цифровой телекоммуникационной системы, синтезированной на основе разработанных ранее алгоритмов декомпозиции и редукции. Рассмотрены основные экспертные показатели качества производительности проектируемой системы, представлены зависимости для расчета данных показателей.

Основной целью проводимой в настоящее время модернизации единой сети электросвязи (ЕСЭ) нашей страны является повышение ее производительности [1]. В этих условиях, перед заказчиками подсистем остро стоит задача экспертизы качества множества технических решений, предлагаемых различными разработчиками на всех этапах строительства подсистем ЕСЭ, с целью контроля показателей производительности сети в целом, что обуславливает необходимость автоматизации процесса формирования экспертных оценок (ЭО) производительности на основе разработки и реализации телекоммуникационных экспертных систем (ТКЭС). Одним из первых этапов разработки подобных систем с искусственным интеллектом является разработка оптимальных (безызбыточных) экспертных систем показателей качества (ЭСПК) и формирование системы критериев их оценивания.

В настоящей статье представлены результаты разработки ЭСПК производительности проектируемой телекоммуникационной системы (ТКС) сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), синтезированных на основе разработанных ранее алгоритмов декомпозиции и редукции [2]. Разработанные ЭСПК составляют предмет экспертной оценки в ходе проектирования перспективных мультисервисных гетерогенных телекоммуникационных систем. Кроме того, сформированная система критериев оценки экспертных показателей качества ТКС позволяет формировать численные значения вероятностей достижения экспертных показателей качества (ЭПК) требуемых величин, которые должны быть реализованы в ТКЭС. Следует отметить, что основные отличия экспертных показателей качества (ПК) от показателей, используемых разработчиками для оценки результатов проектирования, должны состоять в менее детализированном, но, в то же время, более всестороннем (комплексном) охвате существенных свойств ТКС, чувствительных к реализации основополагающих техниче-

ских решений. Кроме того, значительно отличаются методы оценки ПК – если разработчик на определенных этапах проектирования может оценить значения того или иного ПК на макете, стенде, опытной участке сети и т.д., то эксперту в большинстве случаев приходится работать с моделями, позволяющими учесть существенные свойства, как отдельных подсистем, так и ТКС в целом при условии формирования ЭПК, адекватных существенным свойствам проектируемой ТКС.

Экспертиза проектов перспективных высокотехнологичных ТКС невозможна вне рамок системного подхода. Требование системности процесса экспертизы проектов ТКС определяет не только методологию формирования ЭО качества проектного технического решения (ПТР) по построению ТКС, но и подходы к выбору методов формализованного описания существенных свойств сетей данного класса. Результаты анализа ряда работ [2, 3], посвященных математическому описанию современных информационных систем, показывают, что добиться полной формализации свойств, в общем случае, гетерогенных, мультисервисных, пространственно распределенных систем не представляется возможным. Поэтому, одной из главных задач экспертной деятельности в ходе проектирования ТКС является анализ наиболее существенных свойств системы, основанный на их формализованном либо частично формализованном описании.

Основными свойствами ТКС, определяющими качество функционирования сети в целом и представляемыми на сетевом уровне ЭМВОС, являются: производительность, устойчивость, достоверность информационного обмена, управляемость/наблюдаемость, масштабируемость (способность к расширению); мультисервисность (способность к предоставлению услуг по переносу разнородного трафика сети); безопасность процесса информационного обмена; экономичность эксплуатации [2 – 5]. Рассмотрим вопросы оценки производительности телекоммуникационной системы на сетевом уровне ЭМВОС.

Экспертный показатель качества производительности проектируемой ТКС $\vec{Y}_{\text{произв}}$ является основным в данной локальной ЭСПК и характеризует количество информации пользователей мультисервисной сети, содержащейся во всех коммутируемых информационных единицах (КИЕд) – сообщения, пакеты и другие, обслуженных данной сетью полностью и с заданным качеством за единичный интервал времени (шаг) ее функционирования. Это интегральное свойство современных сетей, характеризующее их пропускную способность, время реакции сети и время задержки передачи сообщений (вариация задержки).

Вектор экспертного показателя производительности системы $\vec{Y}_{\text{произв}}$ должен включать следующие векторы: ЭПК пропускной способности $\vec{Y}_{\text{пр.сп}}$; коэффициента использования ресурса пропускной способности $\vec{Y}_{\text{ис}}$; ЭПК времени реакции сети $\vec{Y}_{\text{вр.реак}}$ и ПК задержки передачи и вариации задержки передачи $\vec{Y}_{\text{зад.пер}}$:

1. Экспертный показатель качества пропускной способности ТКС $\vec{Y}_{\text{пр.сп}}(k)$, в общем случае, отражает объем данных, передаваемых ТКС или ее частью в единицу времени, и характеризует возможности сети создавать такое количество стандартных (для данной телекоммуникационной технологии) каналов информационного обмена либо такую скорость передачи, которые соответствует задачам ТКС в конкретный момент времени. Рассмотрим пропускную способность ТКС с точки зрения количества стандартных (для данной технологии) каналов информационного обмена. В этом случае

$$\vec{Y}_{\text{пр.сп}}(k) = \vec{Y}_{N_{\text{кио}}} (k) = \left(N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k); N_{\text{реал}}^{\text{кио}}(k); N_{\text{пот}}^{\text{кио}}(k) \right)^T, \quad (1)$$

где $N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k)$ – количество стандартных (для данной технологии) каналов информационного обмена, образованных ТКС в момент времени k и характеризующих техническую пропускную способность сети – способность ТКС образовать ресурс каналов без учета мешающих воздействий (среда, технические отказы, злоумышленные воздействия и т.д.); $N_{\text{реал}}^{\text{кио}}(k)$ – количество каналов информационного обмена, образованных ТКС в момент времени k и характеризующих реальную пропускную способность сети – способность ТКС образовать каналный ресурс в конкретных условиях обстановки, когда различного рода воздействия уменьшают исходную техническую пропускную способность; $N_{\text{пот}}^{\text{кио}}(k)$ – количество стандартных (64 кбит/сек, 2 048 кбит/сек и т.д. в соответствии с PDH, SDH иерархиями) каналов информационного обмена с учетом дополнительного резерва, спланированного в интересах оперативного управления системой, для восстановления части утраченного ресурса и характеризующих потенциальную пропускную способность сети.

Экспертный показатель качества $N_{\text{реал}}^{\text{кио}}(k)$ может быть связан с $N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k)$ соотношением

$$N_{\text{реал}}^{\text{кио}}(k) = N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k) - \overline{N}_{\text{авар}}^{\text{кио}}(k), \quad (2)$$

где $\overline{N}_{\text{авар}}^{\text{кио}}(k)$ – усредненное значение количества аварийных каналов ТКС, на k -м этапе функционирования сети. В свою очередь ПК $N_{\text{пот}}^{\text{кио}}(k)$ связан с $N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k)$ соотношением

$$N_{\text{пот}}^{\text{кио}}(k) = N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k) + N_{\text{рез}}^{\text{кио}}(k), \quad (3)$$

где $N_{\text{рез}}^{\text{кио}}(k)$ – величина канального резерва ТКС, предназначенного для решения задач оперативного управления сетью в экстремальных условиях особого этапа функционирования сети (например, час наибольшей нагрузки (**ЧНН**)).

Таким образом, значения ЭПК реальной пропускной способности ТКС $N_{\text{реал}}^{\text{кио}}(k)$ должны удовлетворять потребностям СУ в каналах информационного обмена; значения ЭПК потенциальной пропускной способности $N_{\text{пот}}^{\text{кио}}(k)$ – отражать суммарные затраты ТКС (суммарный каналный ресурс), необходимые для выполнения поставленных задач, а значения ПК технической пропускной способности $N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k)$ – включать структурную избыточность ТКС, при этом значения составляющих ЭПК находятся в следующих отношениях:

$$N_{\text{пот}}^{\text{кио}}(k) \geq N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k) \geq N_{\text{реал}}^{\text{кио}}(k). \quad (4)$$

Рассмотрим аналитические выражения для оценки технической пропускной способности, входящей в состав вектора $\vec{Y}_{\text{пр.сп}}$. Техническая пропускная способность ТКС в целом не может превышать совокупную пропускную способность средств информационного обмена нижних уровней ЭМВОС. В этом случае, верхняя граница оценки технической пропускной способности ТКС определяется ресурсами подсистемы множественного доступа (**МД**). Особого внимания в ходе формирования ЭО пропускной способности ТКС требует оценка эффективности предлагающегося к реализации метода радиодоступа.

Рассмотрим ЭПК пропускной способности и накладываемые на них ограничения, при реализации перспективного радиointерфейса UTRA (концепция UMTS) в режиме частотного (FDD) дуплексного разделения каналов. В данном случае техническая пропускная способность радиоподсистемы зависит от способа построения подсистемы МД (способа использования частотно-энергетического ресурса базовых станций). Для случая частотного разделения каналов известен ряд ограничений, аналитически очерчивающих пространство оптимизации, образуемое конечными частотно-энергетическими возможностями базовых станций (БС), и целевая функция вида

$$N_{\text{тех}}^{\text{кио}}(k) = \sum_{\sigma=1}^{\Omega_{\text{MT}}(k)} N_{\sigma}^{\text{MT}}(k) / N_{\sigma}^{\text{кио}}(k) \rightarrow \max_{N_{\sigma}}, \text{ при } \vec{\mathfrak{R}}_{\text{огр}} \in \vec{\mathfrak{R}}_{\text{огр}}^{\text{доп}}, \quad (5)$$

характеризующая оптимальную загрузку (использование) ресурсов мобильных терминалов (МТ).

В качестве вектора ограничений $\vec{\mathfrak{R}}_{\text{огр}}$ выступают:

$$\vec{\mathfrak{R}}_{\text{огр}} = \begin{cases} \sum_{\sigma=1}^{\Omega_{\text{MT}}(k)} N_{\sigma}^{\text{MT}}(k) (\Delta f_{\sigma}(k) + \Delta f_{\text{защ}}(k)) \leq \Delta F_{\text{БС}}(k); \\ \sum_{\sigma=1}^{\Omega_{\text{MT}}(k)} N_{\sigma}^{\text{MT}}(k) P_{\sigma}^{\text{П}}(k) \leq \bar{P}(k); \\ h_j^{2\text{TT}}(k) = \max_{j' \in N_{\Sigma}} h_{jj'}^2(k); \\ N_{\sigma}^{\text{MT}}(k) \leq N_{\sigma}^{\text{TP}}(k), \end{cases} \quad (6)$$

где первое выражение вектора (6) характеризует частотные ограничения, а $\Delta f_{\sigma}(k)$ – полоса частот, необходимая для передачи радиосигнала МТ σ -го типа на k -м этапе функционирования ТКС; $\Delta f_{\text{защ}}(k)$ – полоса частот для защитного интервала между двумя соседними радиосигналами; $\Delta F_{\text{БС}}(k)$ – рабочий частотный ресурс, выделенный БС на k -м этапе функционирования ТКС.

Второе выражение в составе вектора ограничений (6) характеризует энергетические ограничения, где $P_{\sigma}^{\text{П}}(k)$ – мощность передатчика БС, излучаемая в интересах МТ σ -го типа на k -м этапе функционирования ТКС; $\bar{P}(k)$ – средняя мощность передатчика БС.

Третье выражение в составе вектора ограничений (6) характеризует ограничения по уровню радиосигнала j -й БС на входе демодулятора приемника j' -го МТ в jj' -м направлении мобильной связи, где $h_j^{2\text{TP}}(k)$ – требуемое соотношение сигнал/шум, которое должна обеспечить j -ая БС для своих корреспондентов на k -м этапе функционирования ТКС.

Последнее ограничение формирует требование, характеризующее потребности ТКС в количестве МТ различного типа, где $N_{\sigma}^{\text{TP}}(k)$ – требуемое число МТ σ -го типа, одновременно работающих в составе ТКС на k -м этапе ее функционирования.

Кроме того, в качестве ограничений на реализацию в ТКС того или иного метода МД, могут быть использованы показатели эффективности использования ресурса пропускной способности сети. Выражение для расчета значений ЭПК,

характеризующих эффективность использования ресурса пропускной способности сети, может быть представлено следующим образом:

$$R_{\text{эф. исп}}^{\text{РПС}}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{I_{\text{марш}}(k)} \sum_{i'=1}^{I'_{\text{ком}}(k)} \left(\Psi_{ii'}(k) - \sum_{\sigma=1}^{\Omega_{\text{ок}}(k)} (N_{\sigma ii'}^{\text{раб}}(k) + N_{\sigma ii'}^{\text{рез}}(k)) \right)}{\sum_{i=1}^{I_{\text{марш}}(k)} \sum_{i'=1}^{I'_{\text{ком}}(k)} \Psi_{ii'}(k)}, \quad (7)$$

где $I_{\text{марш}}(k)$ и $I'_{\text{ком}}(k)$ – количество маршрутизаторов и коммутаторов соответственно, на базе которых выделяется ресурс пропускной способности на k -м этапе функционирования ТКС; $\Omega_{\text{ок}}(k)$ – количество типов оконечных устройств, используемых в ТКС на k -м этапе функционирования и отличающихся друг от друга количеством организуемых каналов информационного обмена определенного типа (речь, данные, видеоинформация) $N_{\sigma}^{\text{кио}}(k)$, $\sigma = \overline{1, \Omega_{\text{ок}}(k)}$;

$\Psi_{ii'}(k) = \Psi_{ii'}^{\text{раб}}(k) + \Psi_{ii'}^{\text{рез}}(k)$ – часть пропускной способности i -го маршрутизатора i' -го коммутатора, с помощью которого организуются рабочие ($\Psi_{ii'}^{\text{раб}}(k)$) и резервные (скрытые) ($\Psi_{ii'}^{\text{рез}}(k)$) ресурсы сети (каналы информационного обмена); $N_{\sigma ii'}^{\text{раб}}(k)$ – число рабочих оконечных устройств σ -го типа, использующих i -й маршрутизатор и i' -й коммутатор; $N_{\sigma ii'}^{\text{рез}}(k)$ – число резервных оконечных устройств σ -го типа, предназначенных для работы через i' -й коммутатор и i -й маршрутизатор.

Вторым, и наиболее популярным подходом к анализу потенциальной пропускной способности проектируемой ТКС, является подход, больше ориентированный на оценивание пропускной способности как внутрисистемной характеристики. Он состоит в оценке объема данных, передаваемых по каналам ТКС или ее сегменту в единицу времени. Данный подход позволяет оценить скорость выполнения внутренних операций системы – передачи ИС между элементами ТКС через различные коммуникационные устройства. В этом случае пропускная способность непосредственно характеризует качество выполнения основной функции ТКС – транспортировки ИС, обозначается как $V(k)$ и измеряется в бит/с.

Пропускная способность ТКС, с точки зрения объема данных, передаваемых в единицу времени (скорости передачи), имеет два аспекта. С одной стороны, она может быть мгновенной, максимальной или средней (общей пропускной способности ТКС), с другой (как в рассмотренном ранее случае) – различают техническую, потенциальную и реальную пропускную способность.

Средняя пропускная способность вычисляется путем деления общего объема переданных данных $Q_{\text{пер. д}}(k)$ на время их передачи $T_{\text{пер}}(k)$ (в качестве $T_{\text{пер}}(k)$ выбирается достаточно длительный промежуток времени – час, сутки).

$$V_{\text{сред}}(k) = \frac{Q_{\text{пер. д}}(k)}{T_{\text{пер}}(k)}. \quad (8)$$

Мгновенная пропускная способность отличается от средней тем, что для усреднения выбирается достаточно малый промежуток времени, определяемый прогнозируемыми особенностями трафика проектируемой ТКС.

Максимальная пропускная способность – наибольшая мгновенная пропускная способность, зафиксированная в течение какого-либо периода наблюдения:

$$V_{\text{max}}(k) = \max V_{\text{мгнов}}(k). \quad (9)$$

На практике, при проектировании и ЭО перспективных телекоммуникационных систем, чаще всего используются такие показатели, как средняя $V_{\text{сред}}(k)$ и максимальная $V_{\text{max}}(k)$ пропускные способности. Средняя пропускная способность ТКС $V_{\text{сред}}(k)$ позволяет оценить работу сети на большом отрезке времени, когда в силу закона больших чисел пики и спады интенсивности трафика компенсируют друг друга. Максимальная пропускная способность $V_{\text{max}}(k)$ позволяет оценить возможности ТКС справляться с пиковыми нагрузками, характерными для особых периодов работы системы.

Необходимо отметить, что из-за последовательного характера передачи пакетов (сообщений) различными элементами ТКС общая пропускная способность ТКС (любого составного пути в ТКС) во многом будет определяться элементами системы, имеющими минимальные пропускные способности по маршруту передачи ИС. Данный факт следует учитывать в ходе экспертного моделирования и формирования ЭО об оптимальности топологии ТКС.

Общая пропускная способность мультисервисной гетерогенной ТКС может быть определена как среднее количество информации, переданной между всеми узлами сети в единицу времени. В этом случае вектор показателей пропускной способности с точки зрения объема данных, передаваемых ТКС в единицу времени, содержит следующие ЭПК:

$$\vec{Y}_{\text{пр.сп}}(k) = \vec{Y}_V(k) = (V_{\text{тех}}(k); V_{\text{реал}}(k); V_{\text{пот}}(k), R_{\text{эф.исп}}^{\text{РПС}}(k))^T, \quad (10)$$

где $V_{\text{тех}}(k)$ – количество информации, которую ТКС может передать в единицу времени k , характеризующее техническую пропускную способность сети – способность ТКС образовать ресурс скорости передачи информации без учета мешающих воздействий; $V_{\text{реал}}(k)$ – количество информации, которую ТКС может передать в единицу времени k , характеризующее реальную пропускную способность сети – способность ТКС образовать ресурс скорости передачи информации в конкретных условиях обстановки, в условиях различного рода воздействий, уменьшающих исходную техническую пропускную способность (технические отказы, ухудшение ЭМО и другие); $V_{\text{пот}}(k)$ – количество информации, которую ТКС может передать в единицу времени k с учетом дополнительного резерва пропускной способности, спланированного в интересах оперативного управления для восстановления части утраченного ресурса, и характеризующее потенциальную пропускную способность сети, $R_{\text{эф.исп}}^{\text{РПС}}(k)$ – коэффициент использования ресурса пропускной способности ТКС.

Сформулируем критерий оценки пропускной способности ТКС на основе $V(k)$. Им может служить соотношение $\vec{Y}_{\text{пр.сп}}(k) \geq \vec{Y}_{\text{пр.сп}}^{\text{ТР}}(k)$, где $\vec{Y}_{\text{пр.сп}}(k)$, $\vec{Y}_{\text{пр.сп}}^{\text{ТР}}(k)$ – векторный показатель пропускной способности ТКС на k -м шаге функционирования сети и его требуемое значение соответственно. С точки зрения формирования ЭО, наиболее целесообразным выглядит задание критерия оценивания пропускной способности перспективной ТКС в вероятностно-временной форме, то есть как вероятность выполнения требований к пропускной способности ТКС на k -м шаге функционирования сети:

$$P_{\text{пр.сп}}^{\text{ТКС}}(k) = P\left(\vec{Y}_{\text{пр.сп}}(k) \geq \vec{Y}_{\text{пр.сп}}^{\text{ТР}}(k)\right). \quad (11)$$

Вероятность выполнения требований к пропускной способности ТКС должна быть больше или равна требуемой $P_{\text{пр.сп}}^{\text{ТКС}}(k) \geq P_{\text{пр.сп}}^{\text{ТКС тр}}(k)$, где $P_{\text{пр.сп}}^{\text{ТКС тр}}(k)$ – требуемая вероятность выполнения требований к пропускной способности ТКС. Отдельно следует остановиться на формировании требований к эффективности использования ресурса пропускной способности сети. При формировании численных требований необходимо ориентироваться на требования к реальной пропускной способности сети, которые в свою очередь должны учитывать коммерческую привлекательность проекта.

Экспертный показатель качества времени реакции системы $\bar{Y}_{\text{вр. реак}}$ отражает ее интегральное внутреннее свойство, влияющее на производительность мультисервисной системы с точки зрения пользователя. В общем случае время реакции ТКС определяется как интервал времени между появлением на входе ТКС запроса пользователя к какой либо сетевой службе (запрос n -й услуги ТКС по переносу различного вида информации или доступу к сетям контент-провайдеров) и получением на выходе сети ответа на данный запрос – $t_{\text{вр. реак}}^n(k)$. Очевидно, что $t_{\text{вр. реак}}^n(k)$ зависит от типа запрашиваемой n -й услуги, от того, какой пользователь ТКС и к какому серверу услуг обращается, от местонахождения пользователя, а также текущего состояния элементов ТКС – загруженности сегментов, коммутаторов и маршрутизаторов базовой сети, через которые проходит запрос загруженности сервера услуг и т.п.

Поэтому имеет смысл использовать также и средневзвешенную оценку времени реакции ТКС $\bar{t}_{\text{вр. реак}}(k)$, усредняя данный показатель по категории пользователей, типам услуг, количеству серверов и с учетом времени осуществления запроса (от которого в значительной степени зависит загрузка сети – например, запрос в ночное время либо запрос в ЧНН).

Таким образом, вектор параметров времени реакции сети может содержать элементы (параметры)

$$\bar{Y}_{\text{вр. реак}}(k) = \left(t_{\text{вр. реак}}^n(k); \bar{t}_{\text{вр. реак}}(k) \right)^T, \quad (12)$$

где $t_{\text{вр. реак}}^n(k)$ – интервал времени между появлением на входе ТКС запроса пользователя к какой-либо сетевой службе (запрос n -й услуги) и получением на выходе системы ответа на этот запрос на k -м шаге функционирования системы; $\bar{t}_{\text{вр. реак}}(k)$ – средневзвешенную оценку времени реакции ТКС на k -м шаге ее функционирования.

При этом

$$\begin{aligned} t_{\text{вр. реак}}^n(k) = & t_{\text{подг. запр}}^n(k) + t_{\text{пер. запр}}^n(k) + t_{\text{обр. запр}}^n(k) + \\ & + t_{\text{пер. отв. с}}^n(k) + t_{\text{обр. отв}}^n(k) + t_{\text{пер. отв}}^n(k), \end{aligned} \quad (13)$$

где $t_{\text{подг. запр}}^n(k)$ – время подготовки запроса n -й услуги на конечном устройстве ТКС; $t_{\text{пер. запр}}^n(k)$ – время передачи запроса n -й услуги между конечным устройством (ОУ) и сервером услуг ТКС через сегменты сети (радиоинтерфейс, устройства базовой сети); $t_{\text{обр. запр}}^n(k)$ – время обработки запроса n -й услуги

на сервере; $t_{\text{пер. отв. с}}^n(k)$ – время передачи ответной информации от сервера на ОУ; $t_{\text{обр. отв}}^n(k)$ – время обработки ответной информации на запрос n -й услуги на ОУ; $t_{\text{пер. отв}}^n(k)$ – время передачи ответной информации (предоставление услуги, отказ в предоставлении услуги).

Средневзвешенное по количеству конечных устройств ТКС, типам услуг и количеству серверов услуг время реакции системы имеет вид

$$\bar{t}_{\text{вр. реак}}(k) = \frac{\sum_{n_{\text{серв}}=1}^{N_{\text{серв}}(k)} \left(\sum_{n_{\text{абон}}=1}^{N_{\text{ОУ}}(k)} \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{усл}}(k)} t_{\text{вр. реак}}^n(k)}{N_{\text{усл}}(k)} \right) / N_{\text{ОУ}}(k) \right)}{N_{\text{серв}}(k)}, \quad (14)$$

где n – количество типов услуг, оказываемых ТКС, $n = \overline{1, N_{\text{усл}}(k)}$; $N_{\text{ОУ}}$ – количество ОУ сети ($n_{\text{абон}} = \overline{1, N_{\text{абон}}(k)}$); $n_{\text{серв}}$ – количество серверов услуг, к которым обращаются абоненты ТКС ($n_{\text{серв}} = \overline{1, N_{\text{серв}}(k)}$) на k -м шаге функционирования сети, то есть с учетом времени осуществления запроса.

Критерием оптимальности времени реакции ТКС может служить соотношение $\bar{Y}_{\text{вр. реак}}(k) \leq \bar{Y}_{\text{вр. реак}}^{\text{доп}}(k)$, где $\bar{Y}_{\text{вр. реак}}^{\text{доп}}(k)$ – допустимое значение показателя времени реакции ТКС на k -м шаге функционирования системы, вероятностно-временной критерий оценивания времени реакции системы определяется в виде вероятности выполнения требований к времени реакции ТКС на k -м шаге функционирования, например:

$$P_{\text{вр. реак}}^{\text{ТКС}}(k) = P(\bar{Y}_{\text{вр. реак}}(k) \leq \bar{Y}_{\text{вр. реак}}^{\text{доп}}(k)) = P(\bar{t}_{\text{вр. реак}}(k) \leq \bar{t}_{\text{вр. реак}}^{\text{доп}}(k)). \quad (15)$$

Вероятность выполнения требований к времени реакции ТКС должна быть больше или равна требуемой $P_{\text{вр. реак}}^{\text{ТКС}}(k) \geq P_{\text{вр. реак}}^{\text{ТКС тр}}(k)$, где $P_{\text{вр. реак}}^{\text{ТКС тр}}(k)$ – требуемая вероятность выполнения требований к времени реакции ТКС.

Анализируя физический смысл составляющих времени реакции, необходимо отметить, что характеризуя производительность ТКС с точки зрения пользователя, время реакции также отражает и внутренние свойства системы, поскольку характеризуют технические и технологические этапы собственно сетевой обработки информации (пакетов, сообщений) – их передачу от ОУ к серверам услуг ТКС через сегменты системы и коммутационное оборудование ТКС.

Знание сетевых составляющих времени реакции дает возможность формировать ЭО потенциальной производительности отдельных элементов и проектируемой ТКС в целом, выявить узкие места и (в случае необходимости) сформировать рекомендации по модернизации предлагаемых разработчиками проектных решений по построению ТКС.

Экспертный показатель качества задержки передачи и вариации задержки передачи $\bar{Y}_{\text{зад. пер}}$ описывает внутреннее свойство проектируемой ТКС, близкое по смыслу ко времени реакции сети, но отличающееся тем, что всегда характери-

зует сетевые этапы обработки информации, без учета задержек обработки информации. Данное свойство определяется как задержка между моментом поступления пакета (сообщения) на вход системы и моментом появления его на выходе. Обычно качество сети характеризуют величинами максимальной задержки передачи $t_{\max \text{ зад. пер}}(k)$ и вариацией задержки $\Delta t_{\text{зад. пер}}(k)$.

Следует отметить, что не все типы трафика в мультисервисной ТКС чувствительны к задержкам передачи. Задержки передачи информации, не превышающие сотен миллисекунд или нескольких секунд, порождаемые файловой службой или службой электронной почты, мало влияют на качество данных служб, с точки зрения пользователя ТКС. С другой стороны, такие же задержки для речевой информации или видеоизображения существенны – снижается разборчивость речи, появляется дрожание изображения и т.п.

Телекоммуникационная система может обладать высокой пропускной способностью, но иметь значительные задержки передачи, то есть пропускная способность ТКС и задержки передачи могут выступать как независимые параметры, что особенно заметно на примере рассмотрения характеристик каналов информационного обмена, образованных на основе геостационарных спутников. Пропускная способность таких каналов может достигать 2 Мбит/с, в то время как задержка передачи всегда составляет не менее 0,24 с, что определяется большой протяженностью радиотракта (до 76 000 км).

Таким образом, вектор ЭПК задержки передачи $\vec{Y}_{\text{зад. пер}}$ содержит два частных показателя:

$$\vec{Y}_{\text{зад. пер}}(k) = (t_{\max \text{ зад. пер}}(k); \Delta t_{\text{зад. пер}}(k))^T, \quad (16)$$

где $\Delta t_{\text{зад. пер}}(k)$ – вариация задержки передачи на k -м шаге функционирования ТКС, а $t_{\max \text{ зад. пер}}(k)$ – максимальный интервал времени между моментом поступления КИЕд (пакета, сообщения) на вход системы $t_{\text{вх}}(k)$ и моментом появления его на выходе $t_{\text{вых}}(k)$ на k -м шаге функционирования системы

$$t_{\max \text{ зад. пер}}(k) = t_{\text{вых}}(k) - t_{\text{вх}}(k). \quad (17)$$

Критерием оптимальности времени задержки передачи в ТКС может служить соотношение $\vec{Y}_{\text{зад. пер}}(k) \leq \vec{Y}_{\text{зад. пер}}^{\text{доп}}(k)$, где $\vec{Y}_{\text{зад. пер}}^{\text{доп}}(k)$ – допустимое значение показателя времени задержки передачи в ТКС на k -м шаге функционирования, а вероятностно-временной критерий оценивания времени задержки передачи определяется в виде совместной условной вероятности выполнения требований к времени задержки передачи и вариациям задержки передачи в ТКС на k -м шаге функционирования, например:

$$\begin{aligned} P_{\text{зад. пер}}^{\text{ТКС}}(k) &= P\left(\vec{Y}_{\text{зад. пер}}(k) \leq \vec{Y}_{\text{зад. пер}}^{\text{доп}}(k)\right) = \\ &= P_{\text{вр. зад. пер}}^{\text{ТКС}}\left[\left(t_{\max \text{ зад. пер}}(k) \leq t_{\max \text{ зад. пер}}^{\text{доп}}(k)\right) / \left(\Delta t_{\text{зад. пер}}(k) \leq \Delta t_{\text{зад. пер}}^{\text{доп}}(k)\right)\right] \times \\ &\quad \times P_{\text{вар. зад}}^{\text{ТКС}}\left(\Delta t_{\text{зад. пер}}(k) \leq \Delta t_{\text{зад. пер}}^{\text{доп}}(k)\right). \end{aligned} \quad (18)$$

Вероятность выполнения требований к задержке передачи в ТКС должна быть больше или равна требуемой $P_{\text{зад. пер}}^{\text{ТКС}}(k) \geq P_{\text{зад. пер}}^{\text{ТКС тр}}(k)$, где $P_{\text{зад. пер}}^{\text{ТКС тр}}(k)$ – требуемая вероятность выполнения требований к допустимой задержке передачи на k -м шаге функционирования ТКС.

Таким образом, подводя итоги процесса формулировки ЭПК производительности ТКС, отметим, что $\vec{Y}_{\text{произв}}(k)$ содержит три относительно (косвенной взаимосвязью между показателями пропускной способности и временем реакции сети в большинстве случаев можно пренебречь) независимые составляющие

$$\vec{Y}_{\text{произв}}(k) = (\vec{Y}_{\text{пр. сп}}(k); \vec{Y}_{\text{вр. реак}}(k); \vec{Y}_{\text{зад. пер}}(k))^T, \quad (19)$$

а обобщенный вероятностный критерий оценивания производительности представляет собой совместную вероятность выполнения требований по пропускной способности, времени реакции и задержке передачи в ТКС

$$P_{\text{произв}}^{\text{ТКС}}(k) = P_{\text{пр. сп}}^{\text{ТКС}}\left(\vec{Y}_{\text{пр. сп}}(k) \geq \vec{Y}_{\text{пр. сп}}^{\text{тр}}(k)\right) P_{\text{вр. реак}}^{\text{ТКС}}\left(\vec{Y}_{\text{вр. реак}}(k) \leq \vec{Y}_{\text{вр. реак}}^{\text{доп}}(k)\right) \times \\ \times P_{\text{зад. пер}}^{\text{ТКС}}\left(\vec{Y}_{\text{зад. пер}}(k) \leq \vec{Y}_{\text{зад. пер}}^{\text{доп}}(k)\right). \quad (20)$$

Показатели, составляющие основу вектора показателей производительности, в целом характеризуют свойство своевременности информационного обмена в проектируемой ТКС.

Вывод: представленная система экспертных ПК и критериев оценки производительности перспективной ТКС, наиболее выпукло проявляющихся на уровне соответствующем сетевому уровню ЭМВОС, может быть использована для исследования как совокупности, так и отдельных существенных свойств проектируемой системы в ходе организации экспертной деятельности. Разработанная ЭСПК удовлетворяет условиям адекватности и чувствительности к особенностям того или иного проектного решения сетевого уровня ЭМВОС и позволяет провести достаточно глубокий для решения экспертных задач анализ качества технических решений, влияющих на производительность ТКС в целом.

Список литературы

1. О связи : Федеральный закон РФ от 07.07.2003 г. №126-ФЗ. – Текст : электронный // Гарант. – URL : <https://base.garant.ru/186117/> (дата обращения: 20.09.2021).
2. Ненадович, Д. М. Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов / Д. М. Ненадович. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 254 с.
3. Хоменко, Т. В. Обобщенная математическая модель формирования критерия оценивания для решения задачи выбора технических решений / Т. В. Хоменко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 271 – 277.
4. Советов, Б. Я. Построение сетей интегрального обслуживания / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – Л. : Машиностроение, 1990. – 332 с.
5. Терентьев, В. М. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи / В. М. Терентьев, И. Б. Паращук. – СПб. : ВАС, 1995. – 195 с.

Methodology for the Formation of Assessment Values of Expert Performance Indicators for Perspective Automated Digital Telecommunication Systems

D. M. Nenadovich, I. V. Markin

*Military Innovative Technopolis "ERA", ilya.markin.92@bk.ru;
Anapa, Krasnodar Territory, Russia*

Keywords: level of quality; productivity; telecommunications; digital networks; expert system.

Abstract: One of the main goals of modernization of telecommunication networks is to increase its performance. For a quantitative assessment of the success of improving the system, methods were developed for assessing the expert indicators of the performance quality of the designed digital telecommunication system, synthesized on the basis of previously developed decomposition and reduction algorithms. The main expert indicators of the performance quality of the designed system are considered, the dependences for calculating these indicators are presented.

References

1. <https://base.garant.ru/186117/> (accessed 20 September 2021).
2. Nenadovich D.M. *Metodologicheskiye aspekty ekspertizy telekommunikatsionnykh proyektov* [Methodological aspects of the examination of telecommunication projects], Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2008, 272 p. 254 s. (In Russ.)
3. Khomenko T.V. [Generalized mathematical model of the estimation criterion formation for solving the problem of choosing technical solutions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 271-277. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Postroyeniye setey integral'nogo obsluzhivaniya* [Construction of integrated service networks], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1990, 332 p. (In Russ.)
5. Terent'yev V.M., Parashchuk I.B. *Teoreticheskiye osnovy upravleniya setyami mnogokanal'noy radiosvyazi* [Theoretical foundations of multichannel radio communication network management], St. Petersburg: VAS, 1995, 195 p. (In Russ.)

Methodik zur Bildung von Schätzwerten der Experten-Leistungsindikatoren für perspektivische automatisierte digitale Telekommunikationssysteme

Zusammenfassung: Eines der Hauptziele der Modernisierung der Telekommunikationsnetze ist die Steigerung ihrer Produktivität. Um den Erfolg der Verbesserung des Systems quantitativ zu bewerten, sind Verfahren zur Bewertung von Expertenindikatoren der Leistungsqualität des entworfenen digitalen Telekommunikationssystems durchgeführt, die auf der Grundlage zuvor entwickelter Zerlegungs- und Reduktionsalgorithmen synthetisiert worden sind. Die wichtigsten Expertenindikatoren für die Leistungsqualität des entworfenen Systems sind betrachtet, die Abhängigkeiten für die Berechnung dieser Indikatoren sind dargestellt.

Méthode pour la formation des valeurs estimatives des indicateurs experts de la productivité des systèmes de télécommunications numériques automatisés

Résumé: Un des principaux objectifs de la modernisation des réseaux de télécommunications est l'augmentation leur productivité. Pour quantifier le succès de l'amélioration du système, sont élaborée des méthodes pour évaluer les indicateurs de qualité de la productivité du système de télécommunication numérique conçu, synthétisés à la base des algorithmes de la décomposition et de la réduction élaborés précédemment. Sont examinés les principaux indicateurs de la qualité de la performance du système conçu; sont présentées les dépendances pour le calcul de ces indicateurs.

Авторы: *Ненадович Дмитрий Михайлович* – доктор технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела «исследований перспективных военных технологий»; *Маркин Илья Владимирович* – кандидат технических наук, начальник лаборатории клеточных и молекулярно-генетических технологий научно-исследовательского отдела «медико-биологических исследований», ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Краснодарский край, Россия.

Рецензент: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОПИСАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ КАК СЛЕДСТВИЯ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ

Е. И. Алгазин

*Кафедра «Электроника и электротехника», evgeniialgazin@gmail.com;
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, Россия*

Ключевые слова: временные соотношения; диссипация; линейная система автоматики; напряжение на конденсаторе; сохранение энергии.

Аннотация: Предложены понятия состояния во времени исследуемой линейной системы автоматики, которые базируются на описании процессов накопления и диссипации энергии, как атрибута времени диссипации, в рассматриваемых системах. Показано, что исследуемый параметр (напряжение на конденсаторе U_C) имеет проекции в каждой структуре временных соотношений рассматриваемого состояния во времени исследуемой линейной системы автоматики.

Введение

В работах [1, 2] предложены структуры временных соотношений: мнимая, описываемая переменной jt ; комплексная – выражением $t + jt$; вещественная – переменной t ; показаны особенности описания и функционирования линейных систем автоматики (ЛСА) в различных структурах временных соотношений.

В настоящей работе расширен набор исследуемых вопросов за счет введения новых понятий: состояний во времени пилотной цепи ЛСА и величины проекции исследуемого параметра (напряжения на конденсаторе U_C) между структурами временных соотношений внутри состояния во времени ЛСА, а также коэффициента перехода из одной временной структуры в другую исследуемого параметра в различных состояниях во времени пилотной цепи ЛСА.

Исследуется состояние исследуемого параметра U_C в зависимости от происходящего процесса накопления энергии, свойственного состоянию прошлого ЛСА, диссипации накопленной энергии, характерной текущему времени, то есть настоящему ЛСА, и процессу сохранения энергии (бездиссипативному процессу) – будущему ЛСА.

Линейная система автоматики может функционировать только при наличии энергии, то есть изначально нужно накопить энергию, а потом уже либо тратить ее, либо сохранять без диссипации.

Следует различать активные и пассивные способы сохранения энергии. Активные основаны на использовании источника питания, компенсирующего диссипацию, пассивные – на исключении сопротивлений из пилотной цепи либо замене резистора на индуктивность в цепи без индуктивного элемента, состоящей из резистора и емкости, предварительно заряженной до напряжения U_0 .

В качестве рабочего языка исследований принят язык электротехники и линейной алгебры. На языке электротехники дано описание пилотных цепей ЛСА и их исследуемых параметров. Термины и понятия линейной алгебры хорошо описывают проекции исследуемого параметра, находящегося во временных структурах.

Цель работы – на новом, более детальном, уровне продолжить исследование пилотных цепей ЛСА и дать описание их поведения и структур временных соотношений с помощью введенных понятий состояния во времени.

Постановка задачи

Дана пилотная цепь ЛСА в виде последовательно соединенных резистивного элемента, обладающего сопротивлением R , емкостного элемента, обладающего емкостью C . Источник питания отсутствует. Емкостный элемент предварительно заряжен до напряжения U_0 . В дальнейшем такая цепь будет называться пилотная цепь $R-C-0-U_0$.

Элементы цепи $R-C-0-U_0$ подобраны так, что в ней происходит апериодический разряд конденсатора на резистор. Предварительно конденсатор заряжается до напряжения U_0 [3].

Приняты следующие допущения:

- все элементы рассматриваемой цепи сосредоточенные и линейны;
- существуют структуры временных соотношений.

Необходимо дать описание причинности процессов в рассматриваемой цепи $R-C-0-U_0$, как следствие процессов накопления и диссипации энергии; предложить способ перехода из рассматриваемого состояния во времени в требуемое во всех трех структурах временных соотношений; обосновать нахождение исследуемого параметра во всех трех временных структурах одновременно.

Пути решения

Предварительно положим, что процессы заряда конденсатора цепи ЛСА, разряда конденсатора данной цепи, отсутствия диссипации и накопления энергии будут называться соответственно прошлым, настоящим и будущим состоянием во времени.

Рассмотрим процессы зарядки и разряда конденсатора во всех трех структурах временных соотношений.

Для структуры jt имеем следующее аналитическое выражение, представляющее состояние исследуемого параметра U_C :

$$U_C = U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt}.$$

Вещественная и мнимая части U_C описываются соответственно:

$$\operatorname{Re} U_C = U_0 - U_0 \cos \frac{1}{RC}t;$$

$$\operatorname{Im} U_C = U_0 \sin \frac{1}{RC}t.$$

Данное состояние во времени называется будущее со смещением, так как в полученных аналитических выражениях отсутствуют процессы диссипации, а в вещественной части есть смещение U_0 .

Состояние во времени, назовем его будущее (потому, что нет диссипации), в структуре jt описывается следующим образом:

$$U_C = U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt};$$

$$\operatorname{Re} U_C = U_0 \cos \frac{1}{RC}t;$$

$$\operatorname{Im} U_C = -U_0 \sin \frac{1}{RC}t.$$

Для структуры $t + jt$ имеем следующие аналитические выражения для U_C :

$$U_C = U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} e^{-\frac{1}{RC}jt};$$

$$\operatorname{Re} U_C = U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \cos \frac{1}{RC}t;$$

$$\operatorname{Im} U_C = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \sin \frac{1}{RC}t.$$

Такое состояние во времени – настоящее, так как присутствует диссипация. Состояние настоящее (для разряда конденсатора) в структуре $t + jt$ опишем как:

$$U_C = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} e^{-\frac{1}{RC}jt};$$

$$\operatorname{Re} U_C = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \cos \frac{1}{RC}t;$$

$$\operatorname{Im} U_C = -U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \sin \frac{1}{RC}t.$$

Для структуры t исследуемый параметр U_C представим следующим образом:
– прошлое

$$U_C = U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}t};$$

– настоящее

$$U_C = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t};$$

– будущее, которое реализуется следующим образом: в момент времени t_1 в пилотной цепи $R-C-0-U_0$ меняем R на L (индуктивность) и получаем цепь $L-C-0-U_0$, где U_C представлено аналитическим выражением

$$U_C = U_C(t_1) \sin \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Для последующего анализа поведения пилотной цепи R–C–0–U₀ получим *n*-мерные векторы мгновенных значений исследуемого параметра U_C во всех состояниях во времени и всех трех структурах временных соотношений.

Для этого получим проекции U_C внутри каждого состояния во времени по следующим переходам:

$$t \rightarrow t + jt, \quad t \rightarrow jt, \quad t + jt \rightarrow jt;$$

$$t + jt \rightarrow t, \quad jt \rightarrow t, \quad jt \rightarrow t + jt.$$

Полученные результаты представлены в табл. 1, 2.
 Способ перехода из рассматриваемой временной структуры в требуемую для состояния заряда конденсатора основан на использовании коэффициента передачи перехода из структур:
 – *t* в *t + jt*:

$$K_{t,t+jt} = \frac{U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}(t+jt)}}{U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}};$$

Таблица 1

Вещественные проекции U_C в различных структурах временных соотношений

Структура	Длина $\text{Re}U_C$ в структуре	Проекция на структуру		
		t	$t + jt$	jt
Параметр $\text{Re}U_C$. Заряд конденсатора				
t	706,480	706,480	706,428	499,409
$t + jt$	707,707	707,655	707,707	501,148
jt	999,472	706,524	707,757	999,472
Параметр $\text{Re}U_C$. Разряд конденсатора				
t	100,094	100,094	99,719	13,435
$t + jt$	100,094	99,719	100,094	14,651
jt	713,381	95,756	104,422	713,381

Таблица 2

Мнимые проекции U_C в различных структурах временных соотношений

Структура	Длина $\text{Im}U_C$ в структуре	Проекция на структуру		
		t	$t + jt$	jt
Параметр $\text{Im}U_C$. Заряд конденсатора				
t	706,480	706,480	87,236	−12,083
$t + jt$	$6,919 \cdot 10^{-3}$	$8,544 \cdot 10^{-4}$	$6,919 \cdot 10^{-3}$	$3,961 \cdot 10^{-3}$
jt	32,976	−0,564	0,189	32,976
Параметр $\text{Im}U_C$. Разряд конденсатора				
t	100,094	100,094	−4,296	−0,029
$t + jt$	$6,919 \cdot 10^{-3}$	$−2,97 \cdot 10^{-4}$	$6,919 \cdot 10^{-3}$	$3,961 \cdot 10^{-3}$
jt	32,976	$−6,331 \cdot 10^{-3}$	0,189	32,976

– $t + jt$ в jt :

$$K_{t+jt, jt} = \frac{U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt}}{U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}(t+jt)}};$$

– t в jt :

$$K_{t, jt} = \frac{U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt}}{U_0 - U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}}.$$

Для описания исследуемого параметра $U_C = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}$ и диссипации энергии (разряда конденсатора) переход из структуры t в структуру jt осуществляется с помощью следующего коэффициента передачи

$$K_{t, t+jt} = \frac{U_0 e^{-\frac{1}{RC}(t+jt)}}{U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}}.$$

– $t + jt$ в jt

$$K_{t+jt, jt} = \frac{U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt}}{U_0 e^{-\frac{1}{RC}(t+jt)}};$$

– t в jt

$$K_{t, jt} = \frac{U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt}}{U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}}.$$

Выводы

Наличие проекций U_C внутри состояния во времени по указанным выше направлениям перехода из структуры в структуру говорит о том, что исследуемый параметр присутствует одновременно во всех трех структурах временных соотношений внутри всех рассматриваемых состояний во времени. Использование коэффициента перехода из одной временной структуры в другую упрощает анализ состояния исследуемого параметра и позволяет описать параметр в виде аналитического выражения. Предположение о состояниях во времени пилотной цепи позволяет рассмотреть причинность состояний исследуемого параметра и возможности увеличения времени полной диссипации энергии данной цепи. Примененные методы и подходы описания состояния пилотных цепей можно использовать в дополнение к уже существующим.

Список литературы

1. Алгазин, Е. И. Особенности описания линейных систем автоматики при различных структурах временных соотношений / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 388 – 392. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.388-392

2. Алгазин, Е. И. Особенности функционирования линейных систем автоматики при различных структурах временных соотношений / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 604 – 608. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.604-608

3. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Браславский. – М. : Высш. школа, 1977. – 312 с.

Description of the State in Time of Linear Automation Systems as a Consequence of Accumulation and Dissipation of Energy

E. I. Algazin

*Department of Electronics and Electrical Engineering, evgeniialgazin@gmail.com;
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Keywords: temporal relationships; dissipation; linear automation system; capacitor voltage; energy saving.

Abstract: The concepts of the state in time of the investigated linear automation system are proposed, which are based on the description of the processes of accumulation and dissipation of energy, as an attribute of the dissipation time, in the systems under consideration. It is shown that the investigated parameter (voltage across the capacitor U_C) has projections in each structure of the temporal relationships of the considered state in time of the investigated linear automation system.

References

1. Algazin Ye.I. [Features of the description of linear automation systems with different structures of temporal relationships], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 388-392, doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.388-392 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Algazin Ye.I. [Features of the functioning of linear systems of automation for different structures of time relationships], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 604-608, doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.604-608 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotekhniki i elektrotekhnicheskkiye ustroystva radioelektronnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of electrical engineering and electrical devices of electronic equipment: a textbook for high schools], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)

Beschreibung des zeitlichen Zustands von linearen Automatisierungssystemen als Folge der Prozesse der Akkumulation und Dissipation von Energie

Zusammenfassung: Es sind die Konzepte des zeitlichen Zustands des untersuchten linearen Automatisierungssystems vorgeschlagen, die auf der Beschreibung der Prozesse der Akkumulation und Dissipation von Energie als Attribut

der Dissipationszeit in den betrachteten Systemen basieren. Es ist gezeigt, dass der untersuchte Parameter (Spannung am Kondensator U_C) in jeder Struktur Projektionen der zeitlichen Zusammenhänge des betrachteten Zeitzustandes des untersuchten linearen Automatisierungssystems aufweist.

**Description de l'état dans le temps des systèmes linéaires d'automatisation
en tant que conséquence des processus d'accumulation
et de dissipation d'énergie**

Résumé: Sont proposés les concepts d'état dans le temps du système linéaire d'automatisation étudié qui sont basés sur la description des processus d'accumulation et de dissipation d'énergie en tant qu'attribut du temps de dissipation dans les systèmes examinés. Est montré que le paramètre étudié (tension aux bornes du condensateur U_C) a des projections dans chaque structure des rapports temporels de l'état considéré dans le temps du système automatique linéaire étudié.

Автор: *Алгазин Евгений Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

Рецензент: *Разинкин Владимир Павлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы радиотехники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

УДК 661.935, 66.071.6.081
DOI: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.387-400

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ
ЦИКЛИЧЕСКОГО АДсорбЦИОННОГО ПРОЦЕССА
ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ**

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

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
topi@topi.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: адекватность модели; адсорбционное разделение; азот; газовая смесь; кинетические коэффициенты; кислород; массоотдача; массопроводность; механизм цикла «адсорбция – десорбция»; параметрическая идентификация коэффициентов; пористая среда адсорбента.

Аннотация: Для массообменных циклических процессов в системе «адсорбтив – пористая среда адсорбента» при обогащении воздуха кислородом по способу короткоциклового безнагревной адсорбции реализован новый метод определения коэффициентов массоотдачи и массопроводности процессов в системах с твердой фазой из кинетических кривых. Экспериментально доказано, что при адсорбционном разделении атмосферного воздуха скорость циклических процессов «адсорбция – десорбция» могут лимитировать как внутреннее, так и внешнее диффузионные сопротивления. Коэффициенты массопроводности определяются в зависимости от массосодержания распределяемого адсорбтива (O_2 , N_2) методом, не требующим реализации внутридиффузионного кинетического режима. Проведен анализ кинетики технологического процесса обогащения воздуха кислородом, определены коэффициенты массоотдачи и массопроводности, которые могут использоваться в кинетических расчетах и численном исследовании свойств и режимов циклического адсорбционного процесса разделения атмосферного воздуха и концентрирования кислорода.

Обозначения	
a_k – концентрация k -го компонента в адсорбенте, $см^3/г$;	$M_{g,k}$ – молярная масса k -го компонента газовой смеси, $кг/моль$;
$\bar{a}_k$ – среднееобъемная концентрация k -го компонента в адсорбенте, $моль/м^3$;	n – номер цикла адсорбции – десорбции;
a_k^* – величина концентрации k -го компонента в адсорбенте, равновесная текущей концентрации c_k адсорбтива на внешней поверхности гранул, $моль/м^3$;	P – давление газовой смеси, $Па$;
B – параметр, отражающий преобладающий размер микропор в адсорбенте, $1/К^2$;	P_s – давление насыщения для азота, $Па$;
	T_g – температура газа, $К$;
	v_g – скорость газового потока, $м/с$;
	V_k – диффузионный объем k -го компонента газовой фазы;

c_k^{out} – концентрация k -го компонента в газовой фазе на выходе из адсорбера, об.%; d_{gr} – эквивалентный диаметр гранул адсорбента, мм; $D_{\text{ef}, k}$ – эффективный коэффициент диффузии k -го компонента газовой фазы, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_{l, k}$ – коэффициент продольного перемешивания k -го компонента газовой фазы, $\text{м}^2/\text{с}$; D_{md} – коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;	W_0 – предельный адсорбционный объем, $\text{см}^3/\text{г}$; α_{hd} – коэффициент теплоотдачи от газовой смеси к поверхности адсорбента, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $\beta_{\text{mt}, k}$ – коэффициент массоотдачи k -го компонента газовой смеси к поверхности адсорбента, $1/\text{с}$; $\beta_{\text{kin}, k}$ – коэффициент массопроводности k -го компонента в пористой среде адсорбента, $1/\text{с}$; σ – коэффициент аффинности, отн. ед.; τ_{cr} – время достижения критического массосодержания, с
--	--

Введение

Анализ результатов физического моделирования циклического процесса обогащения воздуха кислородом по способу короткоциклового безнагревной адсорбции (**КБА**) показал, что диффузия компонентов газовой смеси (O_2 , N_2) и распространение тепла в газовой смеси к адсорбенту осуществляется в основном в аксиальном направлении относительно движения потока газовой смеси в насыпном слое адсорбента. При этом процесс адсорбции (O_2 , N_2) осуществляется в смешанно-диффузионной области и определяется коэффициентами внешней массоотдачи и массопроводности, скоростью газовой фазы в пористой среде адсорбента, а также равновесными соотношениями концентраций O_2 , N_2 в фазах. Адсорбционное равновесие (изотерма адсорбции) при разделении воздуха и извлечении кислорода на гранулированном адсорбенте NaX описывается уравнением Дубинина–Радускевича [1], причем десорбционные ветви изотерм адсорбции (N_2 , O_2) на цеолите NaX совпадают с адсорбционными [2]. Распределение температуры в грануле адсорбента ввиду его высокой теплопроводности считаем равномерным [2, 3].

В соответствии с принятыми допущениями математическое описание технологического процесса и установки адсорбционного разделения газовой смеси и концентрирования кислорода включает уравнения [4]: 1) покомпонентного материального баланса в газовой фазе с учетом продольной диффузии, представляющее нелинейное дифференциальное уравнение с частными производными параболического типа [3]; 2) кинетики процесса массообмена k -го компонента адсорбтива (N_2 , O_2) с адсорбентом (нелинейное дифференциальное уравнение в обыкновенных производных первого порядка), включающее коэффициенты массоотдачи и массопроводности в пористой среде адсорбента, найденные по экспериментальным кинетическим кривым; 3) изотермы Дубинина–Радускевича (конечное уравнение), описывающее адсорбционное равновесие при разделении атмосферного воздуха на гранулированном адсорбенте NaX [1]; 4) теплового баланса для газовой фазы в элементарном объеме зернистого слоя адсорбента (записывается аналогично уравнению материального баланса) [5]; 5) передачи тепла в элементарном объеме зернистого слоя адсорбента (дифференциальное уравнение в обыкновенных производных первого порядка); 6) начальные и граничные условия для дифференциальных уравнений; 7) дифференциальные уравнения в обыкновенных производных первого порядка, описывающие динамику изменения давления на входе в адсорберы установки, изменения давления и концентрации продуктового газа в ресивере; 8) конечные уравнения, описывающие расходы газовой смеси, проходящей через впускные/выпускные регулирующие клапаны и дроссель установки.

Цель статьи – определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности адсорбтива (азота, кислорода, аргона) в пористой среде цеолитового адсорбента NaX и анализ адекватности математической модели по экспериментально полученным кривым кинетики циклического процесса адсорбционного обогащения воздуха кислородом.

Экспериментальное исследование циклического адсорбционного процесса разделения атмосферного воздуха и концентрирования кислорода

В основе расчета и проектирования любого технологического процесса адсорбционного разделения и очистки газовых смесей (в большинстве случаев протекает в динамических условиях) находится совокупность кривых, отражающих равновесие извлекаемого компонента с адсорбентом, то есть совокупность изотерм сорбции. Ее определяют в широком интервале изменения температур и давлений, охватывающих область рабочих условий проведения процесса как стадии адсорбции, так и стадии десорбции циклического обогащения воздуха кислородом.

Такую совокупность изотерм адсорбции азота цеолитами NaX получали статическим методом на анализаторе Autosorb iQ в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Получение и применение полифункциональных наноматериалов» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» в диапазоне относительных давлений $P/P_s = 0 \dots 1$ на цеолитах NaX (фракции гранул с $d_{gr} \in [1,6 \dots 2,5]$ мм и $d_{gr} \in [3 \dots 5]$ мм) при $T_g = 77,35$ К (рис. 1, а). Далее по известной методике теории объемного заполнения микропор [1] определяли значения $W_0 = 0,262$ см³/г, $B = 2,20 \times 10^{-6}$ 1/К², $E = 12\,902$ Дж/моль.

По уравнению Дубинина–Радушкевича при $n = 2$ и рассчитанным значениям параметров W_0 , B , E строили изотермы адсорбции азота и кислорода на цеолите NaX при температурах 283, 293, 323 К и давлениях $(0 \dots 8) \times 10^5$ Па для воздуха (рис. 1, б). Рассчитанные по уравнению Дубинина–Радушкевича изотермы адсорбции азота и кислорода сопоставляли с экспериментальными изотермами, полученными при тех же температурах и давлениях статическим методом в ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (рис. 1, б). При этом в уравнении Дубинина–Радушкевича [2] использовался коэффициент аффинности $\sigma_{O_2} = 0,65$, уточненный по результатам сопоставления изотерм соответствующего газа с модельным азотом, для которого $\sigma_{N_2} = 1$.

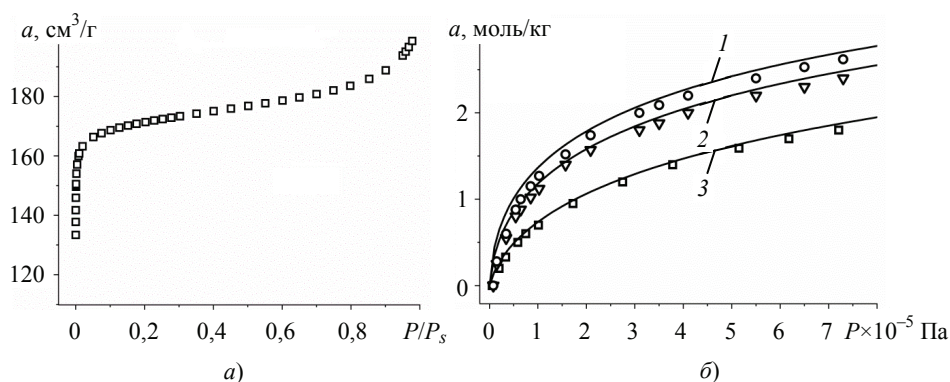


Рис. 1. Изотермы адсорбции азота цеолитом NaX (фракция частиц 1,6...2,5 мм):

a – при $T_g = 77,35$ К; *б* – при T_g : 1 – 283 К; 2 – 293 К; 3 – 323 К;
точки – эксперимент; линии – расчет по уравнению изотермы Дубинина–Радушкевича

Сравнительный анализ рассогласования изотерм адсорбции, полученных по уравнению Дубинина–Радушкевича и экспериментально, показал, что максимальное рассогласование по азоту составляет $\sim 1,25\%$; кислороду – $\sim 1,14\%$. Как следует из анализа, вполне удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных позволяет использовать уравнение изотермы Дубинина–Радушкевича с найденными параметрами для расчета процесса адсорбционного разделения атмосферного воздуха на основе теории объемного заполнения микропор в рабочем диапазоне температур и давлений.

В уравнениях математической модели [5] адсорбционного разделения газовых смесей по способу КБА присутствуют коэффициенты $D_{l,k}$, $\beta_{mt,k}$ и $\beta_{kin,k}$ компонентов адсорбтива (азота, кислорода, аргона), α_{hd} и других, определение которых по экспериментальным данным связано с решением трудоемкой и часто некорректной обратной коэффициентной задачи.

Наиболее простым подходом к определению коэффициентов уравнений модели в первом приближении является использование известных из литературных источников критериальных зависимостей [6]. Однако параметры модели зависят от текущих значений потенциалов переноса (концентрации, температуры и давления в системе) компонентов газовой смеси, которые изменяются в ходе технологического процесса адсорбционного разделения газовых смесей [7–9].

Численные значения коэффициентов продольного переноса определяют экспериментально [10]. Для расчета коэффициента продольного перемешивания газовой смеси D_l в пористой среде адсорбента обычно используют формулу вида

$$D_l = 0,7D_{md} + 0,5v_g d_{gr}, \quad (1)$$

где D_{md} рассчитывается по формуле Фуллера–Шлеттера–Гиддингса

$$D_{md} = \left(10^{-3} T_g^{1,75} \sqrt{\sum_k M_{g,k} / \prod_k M_{g,k}} \right) / \left(P \left(\sum_k V_k^{1/3} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Формула (2) считается вполне обоснованной для расчета коэффициента D_{md} и ее достаточно часто используют в работах по математическому моделированию циклических процессов адсорбционного разделения газовых смесей, в которых учитывается продольное перемешивание газовой фазы в пористой среде адсорбента [11].

Более сложный подход заключается в определении параметров математической модели в виде функциональных зависимостей от потенциалов переноса по экспериментальным кинетическим кривым путем решения регуляризованной обратной коэффициентной задачи [12–14]. В данном подходе для определения коэффициентов массоотдачи $\beta_{mt,k}$, $\beta_{kin,k}$ в первом приближении используются критериальные уравнения [3], а их уточнение проводится по экспериментальным кривым кинетики, соответственно в первом ($\beta_{mt,k}$) и втором ($\beta_{kin,k}$) периодах адсорбции (десорбции) [14].

Во многих работах по математическому моделированию циклических процессов адсорбционного разделения газовых смесей для расчета среднего по всему диапазону концентраций распределяемого вещества в твердой фазе коэффициента массопроводности используют критериальное уравнение вида [15–20]

$$\beta_{kin,k} = 60 D_{ef,k} / d_{gr}^2. \quad (3)$$

Обычно $D_{ef,k}$ рассчитывают по уравнению Bosanquet [21]. В настоящее время не существует единого подхода к расчету $D_{ef,k}$; для одних и тех же газов и адсорбентов разными авторами используются различные методики его расчета [15–20, 22].

Для расчета процесса адсорбционного разделения газовых смесей необходимы данные по коэффициентам массоотдачи и массопроводности компонентов адсорбтива в пористой среде адсорбента, которые в настоящее время находятся опытным путем из кинетических кривых, получаемых на экспериментальном стенде аппаратно-программного комплекса научно-исследовательской лаборатории кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» в заданных рабочих интервалах температур 293...323 К, давлений $(2...6) \times 10^5$ Па и скоростей входящего в адсорбер газового потока 0,1...0,3 м/с [22, 23].

На рисунке 2 представлены отдельные кинетические кривые, полученные в ходе проведения эксперимента при следующих условиях: $T_g = 293, 303, 323$ К; $d_{gr} \in [1,6...2,5]$ мм; $P = (2, 4, 6) \times 10^5$ Па; $v_g = 0,1; 0,2; 0,3$ м/с.

Для расчета процесса адсорбционного разделения газовых смесей, протекающего в смешанно-диффузионной области, необходимы данные по коэффициентам массоотдачи и массопроводности компонентов адсорбтива в пористой среде адсорбента. В работе [14] представлена методика определения коэффициентов $\beta_{mt,k}$ и $\beta_{kin,k}$ из экспериментально полученных кинетических кривых, которая может быть адаптирована для процессов адсорбционного разделения и очистки газовых смесей по способу КБА. Суть данной методики заключается в разбиении кинетической кривой поглощения соответствующего компонента на два периода: в первом периоде процесс адсорбции лимитируется внешней диффузией; во втором – внутренней. Анализ кривых кинетики процесса адсорбции азота и кислорода в пористой среде цеолита NaX (см. рис. 2) показывает, что визуально на кривой кинетики $\bar{a} = \varphi(\tau)$ можно определить критическую точку K_i , $i = 1, 2, 3$, которая разграничивает на первый и второй периоды кинетики

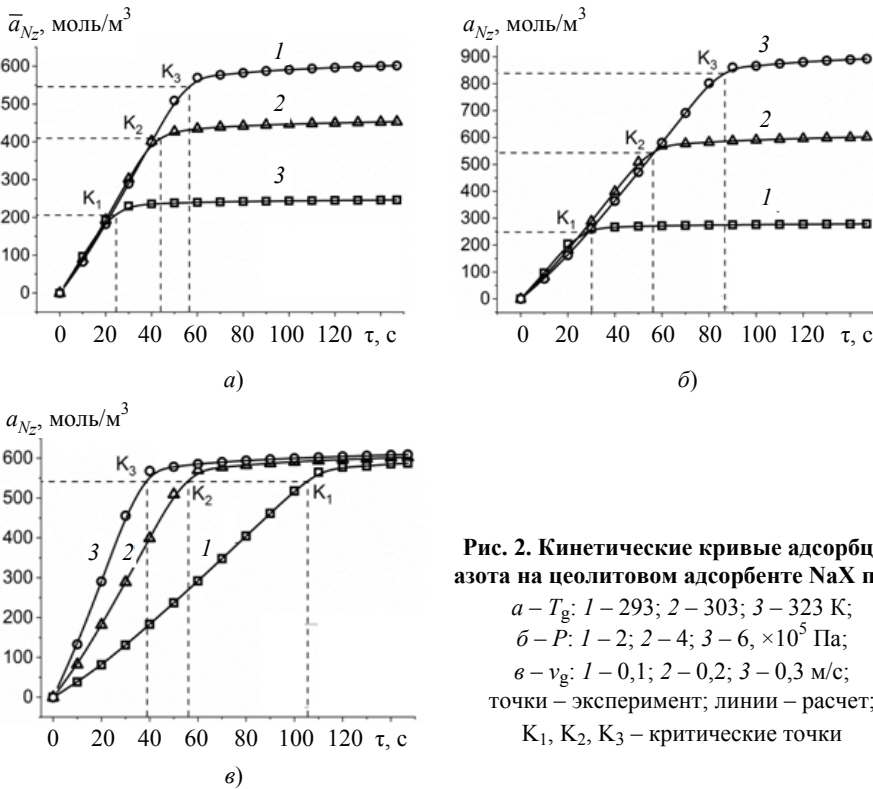


Рис. 2. Кинетические кривые адсорбции азота на цеолитовом адсорбенте NaX при:
a – T_g : 1 – 293; 2 – 303; 3 – 323 К;
б – P : 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6×10^5 Па;
в – v_g : 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3 м/с;
 точки – эксперимент; линии – расчет;
 K_1, K_2, K_3 – критические точки

адсорбции компонентов газовой смеси. В первом периоде (до точки K_i на кривой кинетики) процесс адсорбции лимитируется внешней диффузией, во втором (после точки K_i на кривой кинетики) – внутридиффузионное сопротивление оказывает лимитирующее влияние на кинетику процесса адсорбции.

В первом периоде кинетики скорость процесса $(d\bar{a}/d\tau)_I = N = \text{const}$ постоянна, причем у поверхности гранулы поддерживается постоянная концентрация c^* адсорбтива, при этом интенсивность внутреннего массопереноса достаточно высока, чтобы у поверхности гранулы поддерживать концентрацию насыщения во внешней фазе. В точке K_i начинается второй период кинетики, в котором концентрация адсорбтива у поверхности гранулы становится меньше c^* (в случае адсорбции) и больше (в случае десорбции); при $\tau \leq \tau_{cr}$, τ_{cr} определяется функцией фазового концентрационного равновесия [14].

Рассчитанные в соответствии с методикой [14] коэффициенты массоотдачи β_{mt} , 1/с, полученные в результате обработки экспериментальных кривых (см. рис. 2) в первом периоде, составили: 15,91 при $T_g = 293$ К; 17,04 при $T_g = 303$ К; 26,05 при $T_g = 323$ К; 70,79 при $P = 2 \times 10^5$ Па; 15,91 при $P = 4 \times 10^5$ Па; 5,26 при $P = 6 \times 10^5$ Па; 6,77 при $v_g = 0,1$ м/с; 70,79 при $v_g = 0,2$ м/с; 26,62 при $v_g = 0,3$ м/с. Найденные значения коэффициентов массоотдачи вполне согласуются по их порядку со значениями коэффициентов массотдачи, приведенных в работах [18, 24, 25].

На основании полученной выборки коэффициентов $\beta_{mt}^i, i = 1, 2, \dots, N$, модифицировано критериальное уравнение $Sh = A Re^n Sc^m$ для определения коэффициента $\hat{\beta}_{mt}$ в первом приближении. Задача формулировалась следующим образом: требуется определить коэффициенты критериального уравнения A, n, m , доставляющие минимум функции невязки между рассчитанными по этому уравнению коэффициентами $\hat{\beta}_{mt}^i$ для соответствующих условий осуществления процесса адсорбции и коэффициентами выборки $\beta_{mt}^i, i = 1, 2, \dots, N$, полученной в результате обработки экспериментальных кривых кинетики адсорбции для первого периода:

$$\sum_{i=1}^N \left(\hat{\beta}_{mt}^i(T_g, P, v_g) - \beta_{mt}^i(T_g, P, v_g) \right)^2 \rightarrow \min_{A, n, m},$$

где N – объем выборки; ограничения на диапазоны варьирования искомых коэффициентов: $0,1 < A < 200$; $0,1 < n < 5$; $0,1 < m < 5$.

Решение экстремальной задачи осуществляли в программной среде MATLAB с использованием оптимизационного солвера fmincon. В результате определены усредненные значения коэффициентов критериальных уравнений, позволяющих рассчитывать в первом приближении коэффициенты внешней массоотдачи для азота и кислорода:

$$Sh_{N_2} = 55,21 Re^{0,7} Sc^{0,1}; Sh_{O_2} = 165,59 Re^{0,7} Sc^{0,1}. \quad (4)$$

При определении концентрационной зависимости коэффициента массопроводности $\beta_{kin}(a)$ из кривой кинетики за начало отсчета второго периода принимается точка K_i на кривой кинетики $\bar{a} = \varphi^3(\tau)$. Внутренний массоперенос

адсорбтива в элементарном слое адсорбента толщиной в одну гранулу может быть описан уравнением массопроводности:

$$\frac{da}{d\tau} = \beta_{\text{kin}}(a)(a^* - a), \quad \tau_{\text{cr}} < \tau < \tau_k,$$

$$a(\tau_{\text{cr}}) = a_{\text{cr}}.$$

Сформулируем обратную задачу: требуется найти такую зависимость коэффициента массопроводности $\beta_{\text{kin}}^*(a)$ от концентрации адсорбтива в пористой среде адсорбента, что

$$\Phi(\beta_{\text{kin}}^*(a)) = \int_{\tau_{\text{cr}}}^{\tau_k} \left(a(\tau, \beta_{\text{kin}}^*) - a^{\mathfrak{D}}(\tau) \right)^2 d\tau = \min_{\beta_{\text{kin}}(a) \in B} \Phi(\beta_{\text{kin}}(a)), \quad (5)$$

где $\beta_{\text{kin}}^- < \beta_{\text{kin}}(a) < \beta_{\text{kin}}^+$; β_{kin}^- и β_{kin}^+ – нижняя и верхняя грани множества B непрерывных функций, известные из физических соображений для процесса адсорбции.

Функция $\Phi(\beta_{\text{kin}}(a)) = \int_{\tau_{\text{cr}}}^{\tau_k} \left(a(\tau, \beta_{\text{kin}}^*) - a^{\mathfrak{D}}(\tau) \right)^2 d\tau$ – непрерывная и гладкая по $a(\tau)$ и β_{kin} . Такая функция может быть задана алгоритмом своего вычисления: задать произвольное $\beta_{\text{kin}}^1 \in B$; подставить его вместе с $a^{\mathfrak{D}}(\tau)$ в уравнения модели [4] и, численно проинтегрировав последние при заданных краевых условиях, получить дискретное решение $a(\tau_i, \beta_{\text{kin}}^1)$ в точках $\tau_i, i = \overline{1, m}$; ввести ординаты $a(\tau_i, \beta_{\text{kin}}^1)$ и $a^{\mathfrak{D}}(\tau_i), i = \overline{1, m}$ в сумму $\sum_{i=1}^m \left(a(\tau_i, \beta_{\text{kin}}^1) - a^{\mathfrak{D}}(\tau_i) \right)^2$, умножив последнюю на $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1} = \text{const}$, и получить значение $\Phi(\beta_{\text{kin}}^1(a))$.

Таким образом, (5) представляет собой задачу аргументной оптимизации при связях в форме уравнений математической модели адсорбции [4] с начальными и граничными условиями. Для ее решения целесообразно использовать высокоэффективный квазиньютоновский метод [26].

Покажем алгоритм решения задачи определения зависимости коэффициента массопроводности $\beta_{\text{kin}}^*(a)$ от концентрации адсорбтива в пористой среде адсорбента. На первом шаге определяется средний по всему диапазону концентраций адсорбента в твердой фазе коэффициент массопроводности, то есть $\hat{\beta}_{\text{kin}} = \text{const}$ путем решения задачи (5) с использованием экспериментальной кривой кинетики $\bar{a} = \varphi^{\mathfrak{D}}(\tau)$; проверяется условие адекватности математической модели процесса адсорбции с найденным коэффициентом массопроводности $\hat{\beta}_{\text{kin}}$

$$\delta_{\text{md}} = \left\| a(\tau, \beta_{\text{kin}}) - a^{\mathfrak{D}}(\tau) \right\|_{L_2} < \delta_d, \quad (6)$$

где δ_d – желаемая погрешность математической модели процесса адсорбции.

Если условие (6) выполняется, то средний по всему диапазону концентраций адсорбента в твердой фазе коэффициент массопроводности $\beta_{\text{kin}}^* = \hat{\beta}_{\text{kin}} = \text{const}$ является решением задачи (5) и алгоритм заканчивает свою работу; в противном

случае принимается решение об аппроксимации зависимости коэффициента массопроводности $\beta_{\text{kin}}^*(a)$ от концентрации линейной функцией вида $\beta_{\text{kin}}(a) = b_0 + b_1 a$, формальные коэффициенты $\hat{b}_0, \hat{b}_1$ которой определяются путем решения задачи (5) с использованием экспериментальной кривой кинетики $\bar{a} = \varphi^3(\tau)$. Далее проверяется выполнение условия адекватности математической модели (6) и, если оно выполняется, то $\beta_{\text{kin}}^*(a) = \hat{\beta}_{\text{kin}}(a) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 a$ и алгоритм заканчивает свою работу; в противном случае принимается решение об аппроксимации зависимости коэффициента массопроводности $\beta_{\text{kin}}^*(a)$ от концентрации квадратичной функцией вида $\hat{\beta}_{\text{kin}}(a) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 a + \hat{b}_2 a^2$ и так далее, до тех пор, пока впервые не выполнится условие (6).

С использованием предложенного алгоритма для заданных условий осуществления процесса адсорбции ($T_g = 293 \dots 323$ К, $P = (2 \dots 6) \times 10^5$ Па, $v_g = 0,1 \dots 0,3$ м/с) определены зависимости $\beta_{\text{kin}}^*(a)$ для азота и кислорода:

$$\begin{aligned}\beta_{\text{kin}, \text{N}_2}^*(a) &= 0,0578 + 2,9632 \times 10^{-4} a - 6,5764 \times 10^{-8} a^2; \\ \beta_{\text{kin}, \text{O}_2}^*(a) &= 0,1735 + 8,8897 \times 10^{-4} a - 1,9729 \times 10^{-7} a^2.\end{aligned}\quad (7)$$

При численном решении уравнений математической модели [4] режим стационарного периодического процесса считается достигнутым, если выполняется условие [18, 25]

$$\left| c_{\text{O}_2}^{\text{out}}(n) - c_{\text{O}_2}^{\text{out}}(n-1) \right| \leq 10^{-3}, \quad n = 5, 6, 7, \dots, \quad (8)$$

где $c_{\text{O}_2}^{\text{out}}(n)$ – объемная концентрация продуктового кислорода на выходе из адсорбера в n -м цикле.

Число циклов, необходимых для наступления режима стационарного периодического процесса, обычно составляет $\sim 10 - 15$ для процессов разделения воздуха (в отдельных случаях число циклов может достигать нескольких десятков). На производительных рабочих станциях время достижения режима для медицинских концентраторов кислорода составляет $\sim 1 - 2$ мин, промышленных установок – ~ 10 мин.

С целью проверки адекватности математической модели с найденными коэффициентами массоотдачи и массопроводности адсорбтива в пористой среде адсорбента на экспериментальном стенде аппаратно-программного комплекса получали экспериментальные зависимости изменения концентрации кислорода $c_{\text{O}_2, \text{CSS}}^{\text{out}}$ (англ. Cyclic Steady State (CSS)) на выходе установки КБА в режиме стационарного периодического процесса от продолжительности стадии адсорбции τ_{ads} и высоты L слоя адсорбента при $T_g = 293$ К, $d_{\text{gr}} = 2$ мм (рис. 3).

Среднеквадратическая ошибка рассогласования $\delta_{\text{мм}}$ экспериментальных и расчетных данных для процесса газоразделения воздуха составила 5,87 %, что позволяет использовать математическую модель с определенными параметрами для технологического расчета, оптимизации циклических режимов и проектирования установок КБА для разделения воздуха.

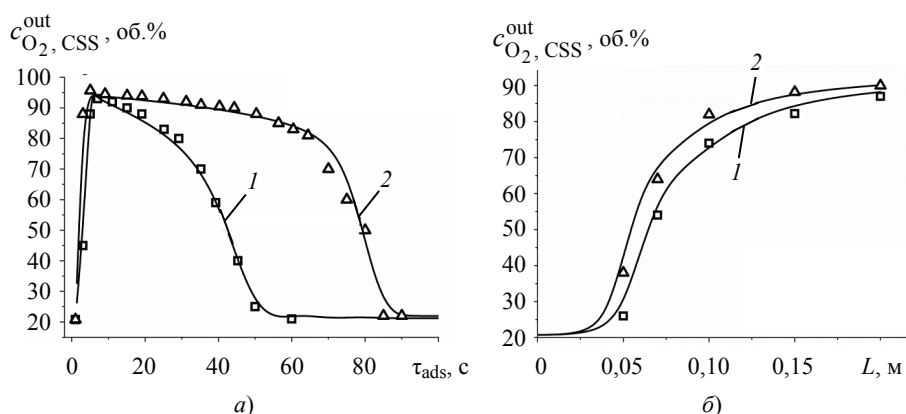


Рис. 3. Зависимости концентрации $c_{O_2, CSS}^{out}$ продуктового кислорода от продолжительности стадии адсорбции τ_{ads} (а) и высоты слоя адсорбента L в установке КБА с гранулированным цеолитовым адсорбентом NaX (б): 1 – $P = 2 \times 10^5$ Па; 2 – $P = 6 \times 10^5$ Па; Δ , $\square$ – эксперимент; — расчет по модели

Заключение

Установлено, что при обогащении воздуха кислородом по способу КБА на скорость процессов адсорбции и десорбции адсорбтива (кислорода, азота) оказывает влияние как внутреннее, так и внешнее диффузионные сопротивления. Коэффициенты массопроводности определяются в зависимости от массосодержания адсорбтива методом, не требующим реализации внутридиффузионного кинетического режима, что существенно упрощает эксперимент.

Определены коэффициенты массоотдачи и массопроводности (диффузии) циклического технологического процесса адсорбционного обогащения воздуха кислородом по экспериментально полученным кривым кинетики, которые используются в кинетических расчетах и численном исследовании свойств и режимов циклического процесса адсорбционного разделения атмосферного воздуха. Доказана адекватность математической модели с найденными коэффициентами массоотдачи и массопроводности.

Новый метод определения коэффициентов массоотдачи и массопроводности процессов в системах с твердой фазой из кинетических кривых, предложенный С. П. Рудобаштой, может быть успешно использован для параметрической идентификации математических моделей технологических процессов разделения многокомпонентных газовых смесей по способу КБА.

Список литературы

1. Дубинин, М. М. Адсорбция и пористость : учеб. пособие / М. М. Дубинин. – М. : Изд-во ВАХЗ, 1972. – 124 с.
2. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 592 с.
3. Ruthven, D. M. Pressure Swing Adsorption / D. M. Ruthven, S. Farooq, K. S. Knaebel. – VCH Publishers, Inc, 1994. – 352 p.
4. Оптимальное проектирование короткоцикловых адсорбционных установок для концентрирования кислорода / Е. И. Акулинин, О. О. Голубятников, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Известия Санкт-Петербургского гос. технологического института (техн. ун-та). – 2017. – № 41 (67). – С. 119 – 127.

5. Suzuki, M. Adsorption Engineering / M. Suzuki. – Tokyo : Kodansha, 1990. – 278 p.
6. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 510 с.
7. Optimization of Hydrogen Purification Performance of Layered Bed Pressure Swing Adsorption / C. Li, J. Xiao, B. Pierre [et al.] // Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban). – 2020. – Vol. 44, No. 4. – P. 753 – 759.
8. Pressure-Swing-Adsorption of Gaseous Mixture in Isotropic Porous Medium: Numerical Sensitivity Analysis in CFD / R. Gautier, T. Dbouk, J. L. Harion [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – Vol. 129. – P. 314 – 326.
9. Computational Fluid Dynamics Modeling in a Fixed Adsorbent Layer During Separation of Gas Mixtures / E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, D. S. Dvoretzky, S. I. Dvoretzky // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1153, No. 1. – P. 012004.
10. Тимофеев, Д. П. Кинетика адсорбции / Д. П. Тимофеев. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 252 с.
11. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праустниц, Т. Шервуд ; пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1982. – 592 с.
12. Rudobashta, S. P. Heat and Mass Transfer in a Fixed Annular Granular Bed / S. P. Rudobashta, V. M. Dmitriev, E. M. Kartashov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2002. – Vol. 36, No. 5. – P. 414 – 418. doi: 10.1023/A:1020609408827
13. Rudobashta, S. P. Calculation of the Kinetics of Drying Disperse Materials on the Basis of Analytical Methods / S. P. Rudobashta // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2010. – Vol. 83, No. 4. – P. 753 – 763.
14. Рудобашта, С. П. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева // Изв. высш. учеб. заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 175 – 180.
15. Ackley, M. W. Medical Oxygen Concentrators: a Review of Progress in Air Separation Technology / M. W. Ackley // Adsorption. – 2019. – Vol. 25. – P. 1437 – 1474.
16. Designing a Commercial Scale Pressure Swing Adsorber for Hydrogen Purification / M. Asgari, H. Anisi, H. Mohammadi, S. Sadighi // Petroleum and Coal. – 2014. – Vol. 56, No. 5. – P. 552 – 561.
17. Simulation and Analysis of Vacuum Pressure Swing Adsorption Using the Differential Quadrature Method / M. A. Makarem, M. Mofarahi, B. Jafarian, Ch.-Ha Lee // Computers & Chemical Engineering. – 2019. – Vol. 121, No. 5. – P. 483 – 496.
18. Ogawa, K. Numerical Analysis of O₂ Concentration, Gas-Zeolite Temperatures in Two Zeolite Columns for an Oxygen Concentrator / K. Ogawa, Y. Inagaki, A. Ohno // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 129. – P. 238 – 254.
19. H₂ Purification by Pressure Swing Adsorption Using CuBTC / B. Silva, I. Solomon, A. M. Ribeiro [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2013. – Vol. 118. – P. 744 – 756.
20. Biegler, L. Recent Advances in Simulation and Optimal Design of Pressure Swing Adsorption Systems / L. Biegler, L. Jiang, V. Fox // Separation and Purification Reviews. – 2004. – Vol. 33, No. 1. – P. 1 – 39.

21. Synergistic Material and Process Development: Application of a Metal-Organic Framework, Cu-TDPAT, in Single-Cycle Hydrogen Purification and CO₂ Capture from Synthesis Gas / M. Asgari, A. Streb, M. W. Van der Spek [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 414. – P. 128778.
22. Моделирование процесса обогащения воздуха кислородом путем поглощения азота в установке короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. Н. Туголуков // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 182 – 196.
23. Software and Hardware Appliance for Research, Modelling and Optimisation of Cyclic Processes of Gas Mixture Separation / E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky // *Energy and Clean Technologies : Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, 02 – 08 July, 2018, Albena, Bulgaria*. – Sofia, 2018. – P. 599 – 606. doi: 10.5593/sgem2018/4.2/S19.077
24. Modelling and Simulation of Two-Bed PSA Process for Separating H₂ from Methane Steam Reforming / H. Li, Z. Liao, J. Sun [et al.] // *Chin. J. Chem. Eng.* – 2019. – Vol. 27 (8). – P. 1870 – 1878.
25. Parametric Studies and Simulation of PSA Process for Oxygen Production from Air / A. K. Beeyani, K. Singh, R. K. Vyas [et al.] // *Polish Journal of Chemical Technology*. – 2010. – Vol. 12, No. 2. – P. 18 – 28.
26. Jiang, L. Simulation and Optimal Design of Multiple-Bed Pressure Swing Adsorption Systems / L. Jiang, V. G. Fox, L. T. Biegler // *AIChE Journal*. – 2004. – Vol. 50, No. 11. – P. 2904 – 2917.

The Experimental Study of the Kinetics of the Cyclic Adsorption Process of Air Enrichment with Oxygen

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

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

Keywords: model adequacy; adsorptive separation; nitrogen; gas mixture; kinetic coefficients; oxygen; mass transfer; mass conductivity; “adsorption - desorption” cycle mechanism; parametric identification of coefficients; porous medium of the adsorbent.

Abstract: For mass transfer cyclic processes in the “adsorptive - porous adsorbent” system when air is enriched with oxygen by the method of short-cycle heatless adsorption, a new method has been implemented for determining the coefficients of mass transfer and mass conductivity of processes in systems with a solid phase from kinetic curves. It has been experimentally proved that during the adsorption separation of atmospheric air, the rate of cyclic “adsorption - desorption” processes can be limited by both internal and external diffusion resistance. The mass conductivity coefficients are determined depending on the mass content of the distributed adsorptive (O₂, N₂) by a method that does not require the implementation of the intradiffusion kinetic regime. The analysis of the kinetics of the process of air enrichment with oxygen is carried out; the coefficients of mass transfer and mass conductivity, which can be used in kinetic calculations and numerical study of the properties and modes of the cyclic adsorption process of atmospheric air separation and oxygen concentration, are determined.

References

1. Dubinin M.M. *Adsorbtsiya i poristost': uchebnoye posobiye* [Adsorption and porosity: a tutorial], Moscow: Izdatel'stvo VAKHZ, 1972, 124 p. (In Russ.)
2. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Basics of adsorption technology], Moscow: Khimiya, 1984, 592 p. (In Russ.)
3. Ruthven D.M., Farooq S., Knaebel K.S. *Pressure Swing Adsorption*, VCH Publishers, Inc, 1994, 352 p.
4. Akulinin Ye.I., Golubyatnikov O.O., Dvoret'skiy D.S., Dvoret'skiy S.I. [Optimal design of short-cycle adsorption plants for oxygen concentration], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2017, no. 41 (67), pp. 119-127. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Suzuki M. *Adsorption Engineering*, Tokyo: Kodansha, 1990, 278 p.
6. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kip'yashchim zernistym sloyem* [Hydraulic and thermal foundations of the operation of devices with a stationary and boiling granular layer], Leningrad: Khimiya, 1968, 510 p. (In Russ.)
7. Li C., Xiao J., Pierre B. [et al.] Optimization of Hydrogen Purification Performance of Layered Bed Pressure Swing Adsorption, *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)*, 2020, vol. 44, no. 4, pp. 753-759.
8. Gautier R., Dbouk T., Harion J.L., Hamon L., Pré P. Pressure-Swing-Adsorption of Gaseous Mixture in Isotropic Porous Medium: Numerical Sensitivity Analysis in CFD, *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 129, pp. 314-326.
9. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoret'skiy D.S., Dvoret'skiy S.I. Computational Fluid Dynamics Modeling in a Fixed Adsorbent Layer During Separation of Gas Mixtures, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1153, no. 1, p. 012004.
10. Timofeyev D.P. *Kinetika adsorbtsii* [Kinetics of adsorption], Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1963, 252 p. (In Russ.)
11. Rid R., Praustnits Dzh., Shervud T., Sokolov B.I. [Ed.] *Svoystva gazov i zhidkostey* [Properties of gases and liquids], Leningrad: Khimiya, 1982, 592 p. (In Russ.)
12. Rudobashta S.P., Dmitriev V.M., Kartashov E.M. Heat and Mass Transfer in a Fixed Annular Granular Bed, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2002, vol. 36, no. 5, pp. 414-418, doi: 10.1023/A:1020609408827
13. Rudobashta S.P. Calculation of the Kinetics of Drying Disperse Materials on the Basis of Analytical Methods, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753-763.
14. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K. [Determination of coefficients of mass transfer and mass conductivity from kinetic curves], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of higher educational institutions. Textile industry technology], 2015, no. 6 (360), pp. 175-180. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Ackley M.W. Medical Oxygen Concentrators: a Review of Progress in Air Separation Technology, *Adsorption*, 2019, vol. 25, pp. 1437-1474.
16. Asgari M., Anisi H., Mohammadi H., Sadighi S. Designing a Commercial Scale Pressure Swing Adsorber for Hydrogen Purification, *Petroleum and Coal*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 552-561.
17. Makarem M.A., Mofarahi M., Jafarian B., Lee Ch.-Ha Simulation and Analysis of Vacuum Pressure Swing Adsorption Using the Differential Quadrature Method, *Computers & Chemical Engineering*, 2019, vol. 121, no. 5, pp. 483-496.

18. Ogawa K., Inagaki Y., Ohno A. Numerical Analysis of O₂ Concentration, Gas-Zeolite Temperatures in Two Zeolite Columns for an Oxygen Concentrator, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 129, pp. 238-254.
19. Silva B., Solomon I., Ribeiro A.M. [et al.] H₂ Purification by Pressure Swing Adsorption Using CuBTC, *Separation and Purification Technology*, 2013, vol. 118, pp. 744-756.
20. Biegler L., Jiang L., Fox V. Recent Advances in Simulation and Optimal Design of Pressure Swing Adsorption Systems, *Separation and Purification Reviews*, 2004, vol. 33, no. 1, pp. 1-39.
21. Asgari M., Streb A., Van der Spek M.W., Queen W., Mazzotti M. Synergistic Material and Process Development: Application of a Metal-Organic Framework, Cu-TDPAT, in Single-Cycle Hydrogen Purification and CO₂ Capture from Synthesis Gas, *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 414, p. 128778.
22. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Tugolukov Ye.N. [Simulation of the process of air enrichment with oxygen by nitrogen absorption in a pressure swing adsorption unit], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 182-196. (In Russ., abstract in Eng.)
23. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretzkiy S.I., Dvoretzkiy D.S. *Energy and Clean Technologies*, Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, 02 - 08 July, 2018, Albena, Bulgaria, Sofia, 2018, pp. 599-606, doi: 10.5593/sgem2018/4.2/S19.077
24. Li H., Liao Z., Sun J. [et al.] Modelling and Simulation of Two-Bed PSA Process for Separating H₂ from Methane Steam Reforming, *Chin. J. Chem. Eng.*, 2019, vol. 27 (8), pp. 1870-1878.
25. Beeyani A.K., Singh K., Vyas R.K., Kumar Sh., Kumar S. Parametric Studies and Simulation of PSA Process for Oxygen Production from Air, *Polish Journal of Chemical Technology*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 18-28.
26. Jiang L., Fox V.G., Biegler L.T. Simulation and Optimal Design of Multiple-Bed Pressure Swing Adsorption Systems, *AIChE Journal*, 2004, vol. 50, no. 11, pp. 2904-2917.

Experimentelle Untersuchung der Kinetik zyklischer Adsorptionsverfahren der Luftanreicherung mit Sauerstoff

Zusammenfassung: Für Stoffaustauschkreisprozesse im System “Adsorptiv - poröses Medium des Adsorbers” bei der Anreicherung von Luft mit Sauerstoff nach dem Verfahren der kurzzyklischen wärmelosen Adsorption ist ein neues Verfahren zur Bestimmung der Stoffübergangskoeffizienten und Massenleitfähigkeit in Systemen mit einer Festphase aus kinetischen Kurven implementiert. Es ist experimentell nachgewiesen, dass bei der Adsorptionstrennung atmosphärischer Luft die Geschwindigkeit der Kreisprozesse “Adsorption - Desorption” sowohl durch den inneren als auch den äußeren Diffusionswiderstand begrenzt werden kann. Massenleitfähigkeitskoeffizienten werden abhängig vom Massengehalt des verteilten Adsorptivs (O₂, N₂) durch das Verfahren bestimmt, das die Implementierung des kinetischen Intradiffusionsregimes nicht erfordert. Die Analyse der Kinetik des technologischen Prozesses der Luftanreicherung mit Sauerstoff ist durchgeführt. Es sind die Koeffizienten des Stoffübergangs und der Massenleitfähigkeit bestimmt, die in kinetischen Berechnungen und numerischen Untersuchungen der Eigenschaften und Modi des zyklischen Adsorptionsprozesses der atmosphärischen Luftzerlegung und Sauerstoffkonzentration verwendet werden können.

Étude expérimentale de la cinétique du processus d'adsorption cyclique de l'enrichissement de l'air en oxygène

Résumé: Pour le transfert de masse des processus cycliques dans le système “produit adsorbé - milieu poreux de l'adsorbant” lors de l'enrichissement de l'air en oxygène par le procédé de d'adsorption courte sans chauffage, est mise en œuvre une nouvelle méthode de la détermination des coefficients de transfert de masse et de conductivité de masse des processus dans les systèmes avec une phase solide de courbes cinétiques. Est prouvé expérimentalement que lors de la séparation par adsorption de l'air atmosphérique, la vitesse des processus cycliques “adsorption - désorption” est limitée par les résistances de diffusion internes et celles externes. Les coefficients de conductivité sont déterminés en fonction de la teneur en masse de l'adsorbant distribué (O_2 , N_2), par la méthode qui ne nécessite pas la mise en œuvre du régime cinétique intra-diffusion. Est effectuée une analyse de la cinétique des processus de l'enrichissement de l'air en oxygène; sont identifiés les facteurs de transfert de masse et de conductivité de masse qui peuvent être utilisées dans des calculs cinétiques et dans l'étude des propriétés et des modes du processus de la séparation de l'air et de la concentration de l'oxygène.

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

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ И СПОСОБЫ ЕЕ АППРОКСИМАЦИИ. ЧАСТЬ 3. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ

Н. А. Меренцов¹, В. А. Балашов¹, А. Б. Голованчиков¹,
М. В. Топилин², А. В. Персидский³

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
steep1e@mail.ru; ФГБОУ ВО «Волгоградский*

государственный технический университет» (1);

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть» (2),

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады» (3);
г. Волгоград, Россия*

Ключевые слова: градиент давления; ламинарная фильтрация; скорость фильтрации; турбулентная фильтрация; фильтрационная кривая; фильтрационные течения; фильтрация.

Аннотация: Рассмотрена структура фильтрационной кривой, построенной в широком диапазоне изменения скоростей фильтрации. Дано подробное описание механизма возникновения и развития инерционной составляющей структуры фильтрационного течения. Представлены уравнения, которые могут быть использованы для аппроксимации фильтрационной кривой. Предложено модифицированное уравнение, обеспечивающее плавный переход от ламинарной к турбулентной фильтрации без разрывов полей скоростей и давлений, которое может быть использовано при выполнении расчетов как одномерных, так и пространственных фильтрационных течений.

Введение

Фильтрационные течения используются во многих промышленных технологических процессах и изделиях различных отраслей машиностроения, в технологиях и оборудовании химической промышленности и родственных ей производств [1 – 14]. Фильтрация используется в процессах водоподготовки и экологических технологиях [15 – 41]. Фильтрационные процессы являются неотъемлемой частью гидрологии и технологий добычи нефти и газа [42].

Простейшей зависимостью для описания закономерностей турбулентной фильтрации является степенное уравнение вида [43, 44]

$$v_{\text{ф}} = K_{\text{ТР}} \left(\frac{\Delta P}{H} \right)^{1/n}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ТР}}$ – коэффициент, учитывающий влияние структуры порового пространства на формирование динамики турбулентного течения; $\Delta P/H$ – полный градиент давления; $1/n$ – показатель степени, отражающий интенсивность проявления сил инерции в турбулентном фильтрационном потоке. Так как значения $K_{\text{ТР}}$ и n явля-

ются функциями скорости фильтрации, то уравнение (1) может быть использовано для описания нелинейной зависимости $\Delta P/H = f(v_\phi)$ в общем случае, только в пределах относительно узкого диапазона изменения скорости фильтрации, поэтому оно может быть применимо для аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой в широком диапазоне изменения скорости фильтрации, только в виде дробно-нелинейной зависимости, как показано на рис. 1, где μ – вязкость жидкости; $v_{кр}$ – критическая скорость фильтрационного течения [45]. Аппроксимация линейной зависимостью этих опытных данных, представленных в координатах $\lg(\Delta P/H) \div \lg v_\phi$, позволяет определить значения $K_{тр}$ и n . Значения n , найденные для ряда интервалов по возрастающей скорости фильтрации, могут служить показателем меры интенсивности нарастания составляющей общего градиента давления за счет сил инерции, обусловленных возрастающей турбулизацией потока в поровом пространстве.

Экспериментальные исследования показывают, что возможные значения n для нелинейной фильтрации находятся в интервале $1 \dots 2$, возрастают по мере увеличения скорости фильтрации [44]. При развитом внутрипоровом турбулентном режиме фильтрации значение n приближается к двум, и при полном его развитии скорость фильтрации в пределах этой области можно определять с помощью квадратичного закона фильтрации [43]

$$v_\phi = K_{тр} \sqrt{\frac{\Delta P}{H}}. \quad (2)$$

Процедура определения значений параметров $K_{тр}$ и n путем линейной аппроксимации экспериментальных данных в системе координат $\lg(\Delta P/H) \div \lg v_\phi$, по существу, равносильна замене отдельных областей фильтрационной кривой отрезками прямых, что позволяет аппроксимировать ее в логарифмической системе координат дробно-линейной зависимостью, которая является другим вариантом графического представления дробно-нелинейной аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой (см. рис. 1).

В тех случаях, когда условия работы технологического аппарата или иного устройства ограничены узким диапазоном измерения рабочих значений скорости фильтрации в области ее нелинейной зависимости, для гидравлического расчета аппарата достаточно иметь формулу, состоящую из одного степенного уравнения, справедливого для данного диапазона скоростей фильтрации.

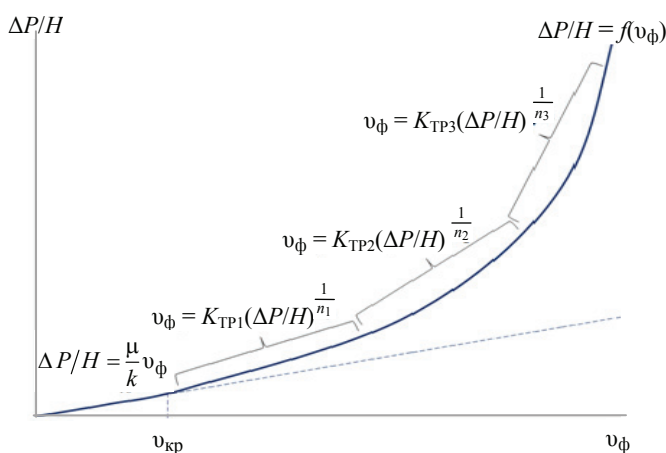


Рис. 1. График дробно-нелинейной аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой

При графической форме представления кусочно-нелинейной аппроксимации фильтрационной кривой соседние аппроксимируемые участки плавно совмещаются, при равенстве значений скорости фильтрации и градиента давления в точке их сопряжения. Однако из структуры степенных уравнений следует, что значения градиента давления в точке их сопряжения, рассчитанные при одинаковой скорости фильтрации, соответствующей данной точке, не могут быть равными. Не будут равными в точке сопряжения и скорости фильтрации, рассчитанные при общем для этой точки значении градиента давления.

Если при построении соседних участков в логарифмической системе координат, необходимом для определения значений параметров K и n , точки их сопряжения будут находиться в пределах допускаемых экспериментом границ их отклонений, то и разрывы значений поля скорости фильтрации и градиента давления в таких точках не будут выходить за пределы этих границ. Поэтому дробно-нелинейная аппроксимация может применяться при выполнении гидравлических расчетов одномерных фильтрационных потоков. Однако при выполнении расчетов пространственных течений с использованием дифференциальных уравнений модель фильтрационного течения с дробно-нелинейной аппроксимацией фильтрационной кривой неприменима из-за невозможности при наличии разрыва поля скоростей задания граничных условий, обеспечивающих гладкое сопряжение соседних фильтрационных потоков.

Исключая наблюдаемый при экспериментальных исследованиях в области малых скоростей фильтрации эффект погрешности и имея в виду условие независимого суммирования сил вязкого трения и инерции в пределах всего возможного диапазона скорости фильтрации, зависимость между скоростью фильтрации и градиентом давления теоретически должна описываться двухчленной формулой вида [46]

$$\frac{\Delta P}{H} = A v_{\Phi} + B v_{\Phi}^2. \quad (3)$$

Впервые такое уравнение было независимо предложено Дюпюи еще в период начальных исследований в области фильтрационных исследований, а затем и Форхгеймером. В настоящее время такое представление о структуре зависимости $\Delta P/H = f(v_{\Phi})$ является общепризнанным. В области фильтрации данное уравнение приобрело форму записи, известную как уравнение Дюпюи–Форхгеймера:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \mu v_{\Phi} + \beta \rho v_{\Phi}^2. \quad (4)$$

где α , β – коэффициенты, отражающие влияние структуры пористого слоя на сопротивление, оказываемое фильтрационному течению, соответственно, силами вязкого трения и силами инерции, $\alpha = 1/k$; ρ – плотность потока.

Уравнение Эргуна является частным случаем уравнения Дюпюи–Форхгеймера, когда значения его коэффициентов α и β выражены через параметры, характеризующие структуру зернистой пористой среды [46, 47].

С позиций представлений о гидродинамическом поведении жидкости при фильтрационном течении сквозь поровое пространство и результатов большого количества экспериментальных исследований по фильтрации жидкостей и газов сквозь различные виды пористых сред, формула (4) наиболее полно показывает картину физического содержания процесса фильтрационного течения жидкостей и газов в широком диапазоне скоростей фильтрации независимо от структуры пористой среды и режима течения. Данная формула отражает тот факт, что при любой скорости фильтрации в потоке всегда будут существовать силы вязкого трения и силы инерции. Доля вклада этих сил в общее сопротивление фильтраци-

онному потоку будет различной, в зависимости от скорости фильтрации, и режим фильтрационного течения фактически всегда будет переходный. При снижении скорости фильтрации, когда второе слагаемое становится существенно меньше по сравнению с первым, им можно пренебречь, и уравнение (4) в предельном случае преобразуется в закон Дарси. То же самое можно сказать и о другом предельном состоянии, когда скорость фильтрации возрастает настолько, что пренебрежимо малым становится первое слагаемое и уравнение (4) преобразуется в квадратичный закон фильтрации.

Уравнение (4) может быть использовано для аппроксимации полной фильтрационной кривой только в том случае, если существование линейного участка экспериментально не обнаруживается или им можно пренебречь в силу его незначительной величины. В противном случае ее следует аппроксимировать с учетом наличия линейного участка, аппроксимируемого уравнением Козени–Кармана (рис. 2). При этом линейный и нелинейный участки плавно сопрягаются в точке, определяемой скоростью фильтрации $v_{кр}$, а продолжение линейного участка является касательной к кривой, определяемой уравнением Дюпюи–Форхгеймера. Таким образом, аппроксимация фильтрационной кривой с помощью уравнения Дюпюи–Форхгеймера находится в полном соответствии с физической картиной гидродинамического поведения фильтрационного течения жидкости в пористой среде. Но при этом условие равенства градиентов давления для обоих участков в точке сопряжения при их определении расчетным путем с помощью уравнений Козени–Кармана и Дюпюи–Форхгеймера для скорости $v_{кр}$ не выполняется. Из структуры данных уравнений следует, что для нелинейного участка в точке сопряжения значение градиента давления будет выше на величину его турбулентной составляющей. Однако это не является нарушением условия плавного сопряжения линейного и нелинейного участков фильтрационной кривой, так как оба они находятся в пределах границ ее возможного отклонения, обусловленного техническими возможностями экспериментальной установки и принятой методики проведения эксперимента, поэтому аппроксимация фильтрационной кривой, имеющей линейный участок, с помощью уравнений Козени–Кармана и Дюпюи–Форхгеймера может быть использована при выполнении расчетов одномерных фильтрационных течений. Однако такая аппроксимация оказывается неприемлемой при расчетах пространственных фильтрационных течений с использованием дифференциальных уравнений из-за невозможности задания граничных условий,

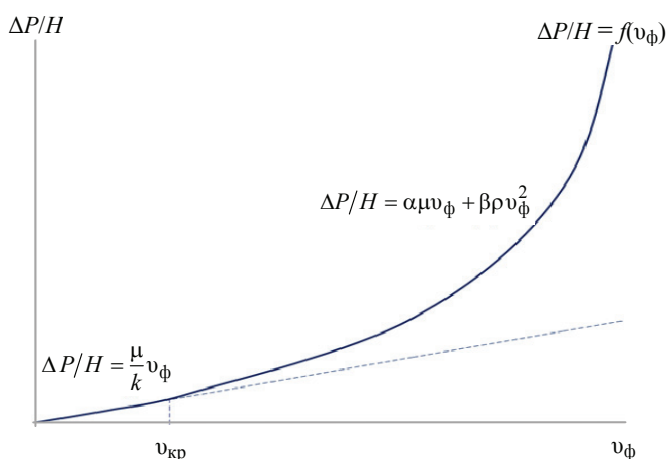


Рис. 2. График аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой уравнением Дюпюи–Форхгеймера

обеспечивающих плавное сопряжение полей давлений фильтрационных потоков соседних участков. Подобного недостатка лишено модифицированное уравнение Дюпюи–Форхгеймера, в котором суммирование сил вязкого трения и инерции начинается не с начала фильтрационной кривой, а только при достижении критической скорости фильтрации $v_{кр}$, соответствующей началу экспериментально обнаруживаемого проявления действия сил инерции в фильтрационном потоке. Такой способ комбинирования совместного действия сил вязкости и инерции в фильтрационном потоке позволяет аппроксимировать фильтрационную кривую, содержащую линейный и нелинейный участки, единым уравнением

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \mu v_{\phi} + \left(\frac{v_{\phi} - v_{кр}}{B} \right)^m, \quad (5)$$

где m – показатель степени, изменяющийся в пределах 1...2; B – коэффициент, определяемый структурой пористой среды. Данное уравнение является аппроксимирующим для фильтрационной кривой в нелинейной области, когда $v_{\phi} > v_{кр}$. При $v_{\phi} = v_{кр}$ оно обращается в уравнение Козени–Кармана, но при этом сохраняется равенство производных $d(\Delta P/H)/dv_{\phi}$ на границе сопряжения линейного и нелинейного фильтрационных течений, поэтому уравнение (5) может быть рекомендовано для расчета пространственных фильтрационных течений.

В химико-технологическом и экологическом оборудовании, работающем с использованием фильтрационных течений (фильтрования, сушки, адсорбции, ионного обмена, десорбции, абсорбции, экстракции, ректификации и других процессов), режим фильтрации с квадратичным законом (или близким к нему) во многих случаях оказывается недостижимым или нецелесообразным по причине того, что оптимальные условия работы такого оборудования достигаются еще до начала формирования данного режима. Поэтому в таких случаях практически достаточным оказывается получение фильтрационной кривой в границах, не превышающих область начала формирования развитого турбулентного режима. Зачастую при выполнении расчетов по фильтрации или проведении научных исследований нет необходимости получения фильтрационной кривой в широком интервале скоростей фильтрации и предполагается ее получение только в пределах диапазона значений скоростей фильтрации, определяемых целью исследования или техническими возможностями оборудования экспериментальной установки. В таких условиях «неполная» фильтрационная кривая может быть представлена областью только ламинарной или турбулентной фильтрации или соответствовать части фильтрационной кривой в области их совместного проявления.

При проведении научных исследований в целях получения или уточнения расчетных уравнений, предпочтение отдается аппроксимирующим уравнениям, в структуре которых отражаются значения параметров, характеризующих пористый материал, или они являются зависимостями, допускающими экстраполирование переменных параметров процесса фильтрации за пределы границ, в рамках которых проводились экспериментальные исследования. К таким зависимостям, например, относятся уравнения Козени–Кармана, Эргуна, Дюпюи–Форхгеймера. Если целью экспериментальных исследований является получение интерполяционных зависимостей, то целесообразно использование степенных уравнений и полиномов, для получения которых экспериментальные исследования являются менее затратными. Такие зависимости, являясь менее информативными относительно понимания гидродинамической картины фильтрационного течения, позволяют с высокой точностью аппроксимировать фильтрационную кривую в пределах границ полученных экспериментальных данных, что очень важно для оценки качества и управления работой технологического оборудования, работающего с использованием фильтрационных течений.

Заключение

Рассмотрена структура фильтрационной кривой, построенной в широком диапазоне изменения скоростей фильтрации в пределах от их нулевого значения до развитого турбулентного режима фильтрации. В общем случае полная фильтрационная кривая может быть представлена двумя плавно сопрягаемыми участками: линейным и нелинейным, фильтрацию в пределах которых называют соответственно ламинарной и турбулентной. Показано, что граница сопряжения линейного и нелинейного участков полной фильтрационной кривой не может быть точно определена. Рассмотрено влияние объективных и субъективных факторов на определение скорости фильтрации $v_{кр}$, условно принимаемой в качестве границы их сопряжения. В области малых скоростей фильтрации опытные данные могут быть аппроксимированы линейной зависимостью, выражаемой законом Дарси. Определены границы, в пределах которых проявляется действие закона Дарси.

Рассмотрены уравнения Козени–Кармана, степенные и Дюпюи–Форхгеймера, которые могут быть использованы для аппроксимации фильтрационной кривой; различные варианты аппроксимации фильтрационной кривой указанными уравнениями в условия как однорежимного фильтрационного течения, только ламинарного или турбулентного, так и при наличии сопрягаемых фильтрационных потоков с разными режимами фильтрационного течения.

Показано, что кусочно-нелинейная аппроксимация фильтрационной кривой и ее аппроксимация в области сопряжения линейного и нелинейного участков совместно уравнением Козени–Кармана для линейного участка и уравнениями степенным или Дюпюи–Форхгеймера для нелинейного, могут быть использованы при выполнении расчетов одномерных фильтрационных течений, но оказываются неприемлемыми при выполнении пространственных фильтрационных течений из-за невозможности задания граничных условий, обеспечивающих гладкое сопряжение полей скоростей и давлений.

Предложено модифицированное уравнение Дюпюи–Форхгеймера, которое может быть использовано при выполнении расчетов как одномерных, так и пространственных фильтрационных течений. При аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой с использованием степенной зависимости или модифицированного уравнения Дюпюи–Форхгеймера, значения показателей степени n и m , найденные для ряда интервалов фильтрационной кривой, построенных по возрастающей скорости фильтрации, могут служить показателем меры интенсивности нарастания инерционной составляющей общего градиента давления.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук МК-1287.2020.8 «Моделирование процессов управления в массообменном экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании».

Список литературы

1. Области влияния источника примеси в фильтрационных потоках / Б. Г. Покусаев, Д. А. Казенин, С. П. Карлов, Ю. Н. Скочилова // Экология и промышленность России. – 2008. – № 4. – С. 41 – 43.
2. Малыгин, Е. Н. Методика автоматизированного выбора и расчета фильтров для разделения суспензий / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, С. Н. Маковеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 659 – 668.
3. Эксергетический анализ и выбор энергосберегающих параметров импульсной регенерации фильтров, улавливающих пыль из сушильного агента / Ю. В. Красовицкий, Р. А. Важинский, Е. В. Романюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 605 – 607.

4. Self-organization of Processes in Gas and Liquid-Phase Catalytic Reactors / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, V. V. Groshev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 044041.
5. Меренцов, Н. А. Моделирование теплообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения : монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 140 с.
6. Применение углеродных нанотрубок для повышения эффективности работы волокнистых фильтров сверхтонкого обеспыливания газов / А. Е. Бураков, И. В. Иванова, Е. А. Буракова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 649 – 655.
7. Система централизованного сбора, переработки и утилизации отработанных травильных и гальванических растворов и шламов / Н. А. Меренцов, С. А. Бохан, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – № 53 (72). – С. 123 – 131.
8. Новые конструктивные решения зернистых фильтров и перспективы их применения при тепловой сушке в химической и пищевой технологии / Ю. В. Красовицкий, Е. В. Романюк, Р. А. Важинский, Н. Н. Лобачева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 608 – 614.
9. Голованчиков, А. Б. Уравнение фильтрации для насадочных контактных устройств / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 8 – 10.
10. Леонтьева, А. И. Использование циклично-импульсного режима промывки паст на фильтровальном оборудовании для повышения качественных характеристик пигментов / А. И. Леонтьева, М. А. Колмакова, В. С. Орехов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 113 – 119.
11. Автоматическое управление режимами работы аппаратов испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, В. Н. Лебедев, А. В. Персидский [и др.] // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 124 – 135.
12. Авторежимные насадочные колонны для пульсационной жидкостной экстракции / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, А. Б. Голованчиков // Экологические системы и приборы. – 2020. – № 3. – С. 3 – 14. doi: 10.25791/esip.03.2020.1140
13. Степыкин, А. В. Массообменные характеристики регулярной насадки с внедренными теплообменными модулями / А. В. Степыкин, А. А. Сидягин, В. М. Ульянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 445 – 452. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.445-452
14. Химвинга, М. Интенсификация процесса абсорбционной очистки газов в аппаратах распылительного типа / М. Химвинга, С. Ю. Панов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 58 – 67.
15. Автоматическое управление режимами работы насадочных аппаратов селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев, А. Б. Голованчиков // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 10 – 16. doi: 10.18412/1816-0395-2020-2-10-16
16. Перспективы использования промышленных отходов машиностроительных предприятий для решения экологических проблем строительной отрасли / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 182 – 195.
17. Математическое моделирование процесса обогащения кислородом воздуха в установке короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 341 – 355.

18. Расчеты массообменных процессов с учетом энерго- и ресурсосбережения : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, К. В. Черикова. – Волгоград : Волгоградский гос. техн. ун-т, 2019. – 128 с.
19. Голованчиков, А. Б. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока : монография / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов. – Волгоград : Волгоградский гос. техн. ун-т, 2018. – 128 с.
20. Современные тенденции по уменьшению энергозатрат кислороддобывающих установок короткоцикловой безнагревной адсорбции / Е. И. Акулинин, А. А. Ермаков, Д. С. Дворецкий, С. И. Симаненков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 597 – 601.
21. Моделирование процесса обогащения воздуха кислородом путем поглощения азота в установке короткоцикловой адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 182 – 196.
22. Математическое моделирование процесса адсорбции углекислого газа / В. Г. Матвейкин, С. Б. Путин, С. А. Скворцов, С. С. Толстошеин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 603 – 609.
23. Меренцов, Н. А. Экспериментальное исследование характеристик тепло-массообменных насадочных устройств : учеб. пособие / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : Волгоградский гос. техн. ун-т, 2018. – 94 с.
24. Сергунин, А. С. Исследование динамики адсорбции и десорбции паров воды активным оксидом алюминия и цеолитом NaX / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 664 – 671.
25. Адсорбция в колонне непрерывного действия с диффузионной структурой потока по газовой фазе / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2016. – № 2. – С. 23 – 31.
26. Рухов, А. В. Математическое моделирование процессов адсорбции ионов кобальта Co^{2+} активированными углями, модифицированными углеродными нанотрубками / А. В. Рухов, И. В. Романцова, Е. Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 360 – 367.
27. Акулинин, Е. И. Исследование процессов тепло- и массообмена при обогащении воздуха кислородом методом короткоцикловой адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 411 – 419.
28. Моделирование ионообмена в аппарате непрерывного действия с диффузионной структурой потока по жидкости / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 10. – С. 15 – 23.
29. Оптимизация и управление циклическим процессом адсорбционного обогащения воздуха кислородом / В. Г. Матвейкин, С. А. Скворцов, Е. И. Акулинин, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 556 – 568. doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568
30. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода / В. Г. Матвейкин, А. А. Ишин, С. А. Скворцов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 548 – 556. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556
31. Golovanchikov, A. B. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, M. V. Topilin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – P. 012023.

32. Елизарова, В. А. Метод экспресс-оценки адсорбционных свойств поглотителя на основе гидроксида циркония / В. А. Елизарова, Ю. А. Гранкина, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 94 – 97. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.094-097
33. Беляев, Д. С. Математическое моделирование процесса адсорбционного разделения газовой смеси при многослойной загрузке шихты / Д. С. Беляев, С. Б. Путин, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 409 – 417.
34. Ломовцева, Е. Е. О пористой структуре гибридных сорбирующих материалов для осушки воздуха / Е. Е. Ломовцева, М. А. Ульянова, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 299 – 305.
35. Сергунин, А. С. О глубокой осушке воздуха применительно к бортовым кислорододобывающим установкам / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 197 – 202.
36. Полезная модель к патенту 195520 Российская Федерация, МПК B01D 53/00. Массообменный аппарат для электросорбционных процессов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2019116909 ; заявл. 31.05.2019 ; опубл. 30.01.2020, Бюл. № 4. – 6 с.
37. Полезная модель к патенту 195503 Российская Федерация, МПК B01D 53/06. Массообменный аппарат непрерывного действия / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2019116945 ; заявл. 31.05.2019 ; опубл. 29.01.2020, Бюл. № 4. – 6 с.
38. Полезная модель к патенту 195502 Российская Федерация, МПК B01D 53/06. Теплообменный аппарат / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2019116903 ; заявл. 31.05.2019 ; опубл. 29.01.2020, Бюл. № 4. – 6 с.
39. Методы концентрирования диоксида углерода в системе регенерации воздуха в условиях длительных пилотируемых космических полетов / Н. В. Постернак, С. Б. Путин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 173 – 181.
40. Путин, С. Б. Математическое моделирование процесса регенерации воздуха в замкнутом объеме / С. Б. Путин, Д. Л. Симонова, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 953 – 956.
41. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes / N. A. Merentsov, A. B. Golovanchikov, M. V. Topilin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 055028.
42. Троицкий, В. М. Феноменологический подход к анализу экспериментальных данных о газопроницаемости в пористых средах. Истинная причина эффекта Клинкенберга / В. М. Троицкий // Вести газовой науки. – 2017. – № 2 (30). – С. 110 – 124.
43. Требин, Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах / Г. Ф. Требин ; под ред. И. М. Муравьева. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 157 с.
44. Пыхачев, Г. Б. Подземная гидравлика / Г. Б. Пыхачев. – М. : Гостоптехиздат, 1961. – 387 с.
45. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 2. Верхний предел применения закона Дарси / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 245 – 254. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.245-254

46. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 512 с.

47. Айнштейн, В. Г. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов. – М. : Логос ; Высшая школа, 2014. – 912 с.

The Structure of Filter Curve and Methods of Its Approximation. Part 3. Equations for Filter Curve Approximation

N. A. Merentsov¹, V. A. Balashov¹, A. B. Golovanchikov¹,
M. V. Topilin², A. V. Persidskiy³

*Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production,
steple@mail.ru; Volgograd State Technical University (1);
OOO LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft (2),
JSC Federal Research and Production Center "Titan-Barricades" (3);
Volgograd, Russia*

Keywords: pressure gradient; laminar filtration; filtration rate; turbulent filtration; filtration curve; filtration currents; filtration.

Abstract: The paper describes the structure of the filtration curve built in a wide range of variation of filtration rates. A detailed description of the mechanism of occurrence and development of the inertial component of the filtration flow structure is given. Equations are presented that can be used to approximate the filtration curve. A modified equation is proposed that provides a smooth transition from laminar to turbulent filtration without discontinuities of the velocity and pressure fields, which can be used when calculating both one-dimensional and spatial filtration flow.

References

1. Pokusayev B.G., Kazenin D.A., Karlov S.P., Skochilova Yu.N. [Areas of influence of the source of impurities in filtration flows], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 4, pp. 41-43. (In Russ.)
2. Malygin Ye.N., Karpushkin S.V., Makoveyev S.N. [Method of automated selection and calculation of filters for separating suspensions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 659-668. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Krasovitskiy Yu.V., Vazhinskiy R.A., Romanyuk Ye.V., Lobacheva N.N., Arkhan-gel'skaya Ye.V. [Exergetic analysis and selection of energy-saving parameters of pulsed regeneration of filters that trap dust from a drying agent], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 605-607. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Groshev V.V., Kozlovtssev V.A., Golovanchikov A.B. Self-organization of Processes in Gas and Liquid-Phase Catalytic Reactors, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 044041.
5. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Modelirovaniye teplomassoobmennyykh nasadochnyykh ustroystv s razvitym kapel'nyim rezhimom techeniya: monografiya* [Modeling of heat and mass transfer packed devices with a developed drip flow regime: monograph], Volgograd: VolGUTU, 2019, 140 p. (In Russ.)

6. Burakov A.Ye., Ivanova I.V., Burakova Ye.A., Tkachev A.G., Tarov V.P. [The use of carbon nanotubes to improve the efficiency of fibrous filters for ultrafine dust removal], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 649-655. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Merentsov N.A., Bokhan S.A., Lebedev V.N., Persidskiy A.V., Balashov V.A. [System of centralized collection, processing and disposal of spent pickling and galvanic solutions and slimes], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2018, no. 53 (72), pp. 123-131. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Krasovitskiy Yu.V., Romanyuk Ye.V., Vazhinskiy R.A., Lobacheva N.N. [New constructive solutions of granular filters and prospects for their use in thermal drying in chemical and food technology], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 608-614. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Merentsov N.A. [Filtration equation for packed contact devices], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2017, no. 1, pp. 8-10. (In Russ.)
10. Leont'yeva A.I., Kolmakova M.A., Orekhov V.S. [The use of a cyclic-pulse mode of washing pastes on filtering equipment to improve the quality characteristics of pigments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 113-119. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Merentsov N.A., Lebedev V.N., Persidskiy A.V., Shilikhin A.S., Golovanchikov A.B. [Automatic control of operating modes of evaporative cooling apparatus for industrial circulating water], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture], 2019, no. 4 (77), pp. 124-135. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. [Auto-mode packed columns for pulsating liquid extraction], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2020, no. 3, pp. 3-14, doi: 10.25791/esip.03.2020.1140 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Stepykin A.V., Sidiyagin A.A., Ul'yanov V.M. [Mass transfer characteristics of a regular packing with embedded heat exchange modules], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 445-452, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.445-452 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Khimvinga M., Panov S.Yu. [Intensification of the absorption process of gas cleaning in spray-type devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 58-67. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Golovanchikov A.B. [Automatic control of operating modes of packed devices for selective purification of gas emissions], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 10-16, doi: 10.18412/1816-0395-2020-2-10-16 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Karasev A.G., Golovanchikov A.B. [Prospects for the use of industrial waste from machine-building enterprises for solving environmental problems of the construction industry], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2019, no. 4 (77), pp. 182-195. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Yermakov A. A., Simanenkova S. I. [Mathematical modeling of the process of enrichment with air oxygen in a pressure swing adsorption unit], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 341-355. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A., Cherikova K.V. *Raschety massoobmennyykh protsessov s uchetom energo- i resursosberezheniya: uchebnoye posobiye* [Calculations of mass transfer processes taking into account energy and resource conservation: a tutorial], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2019, 128 p. (In Russ.)
19. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A. *Modelirovaniye sorbtionnykh protsessov s uchetom struktury potoka: monografiya* [Modeling of sorption processes taking into account the flow structure: monograph], Volgograd: VolGTU, 2018, 128 p. (In Russ.)
20. Akulinin Ye.I., Yermakov A.A., Dvoretzkiy D.S., Simanenkov S.I. [Current trends in reducing the energy consumption of oxygen-extracting installations of short-cycle heatless adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 597-601. (In Russ., abstract in Eng.)
21. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Tugolukov Ye.N. [Modeling the process of air enrichment with oxygen by nitrogen absorption in a pressure swing adsorption unit], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 182-196. (In Russ., abstract in Eng.)
22. Matveykin V.G., Putin S.B., Skvortsov S.A., Tolstoshein S.S. [Mathematical modeling of the adsorption process of carbon dioxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 603-609. (In Russ., abstract in Eng.)
23. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Eksperimental'noye issledovaniye kharakteristik teplomassoobmennyykh nasadochnyykh ustroystv: uchebnoye posobiye* [Experimental study of the characteristics of heat-mass transfer packing devices: a tutorial], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2018, 94 p. (In Russ.)
24. Sergunin A.S., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. [Study of the dynamics of adsorption and desorption of water vapor by active aluminum oxide and zeolite Nax], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 664-671. (In Russ., abstract in Eng.)
25. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Adsorption in a continuous column with a diffusion structure of the flow through the gas phase], *Ekologicheskkiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2016, no. 2, pp. 23-31. (In Russ., abstract in Eng.)
26. Rukhov A.V., Romantsova I.V., Tugolukov Ye.N. [Mathematical modeling of adsorption of cobalt ions by Co^{2+} activated carbons modified with carbon nanotubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 360-367. (In Russ., abstract in Eng.)
27. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. [Investigation of heat and mass transfer processes during air enrichment with oxygen by the method of pressure swing adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 411-419. (In Russ., abstract in Eng.)
28. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Modeling of ion exchange in a continuous apparatus with a diffusion structure of the flow through a liquid], *Ekologicheskkiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2015, no. 10, pp. 15-23. (In Russ., abstract in Eng.)
29. Matveykin V.G., Skvortsov S.A., Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy S.I. [Optimization and control of the cyclic process of adsorption enrichment of air with oxygen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 556-568, doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568 (In Russ., abstract in Eng.)
30. Matveykin V.G., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretzkiy S.I. [Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and hydrogen production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 548-556, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556 (In Russ., abstract in Eng.)

31. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Topilin M.V. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, p. 012023.
32. Yelizarova V.A., Grankina Yu.A., Gatapova N.Ts. [Method of rapid assessment of the adsorption properties of an absorber based on zirconium hydroxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 94-97, doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.094-097 (In Russ., abstract in Eng.)
33. Belyayev D.S., Putin S.B., Skvortsov S.A. [Mathematical modeling of the process of adsorption separation of a gas mixture with multilayer loading of a charge], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 2, pp. 409-417. (In Russ., abstract in Eng.)
34. Lomovtseva Ye.Ye., Ul'yanova M.A., Gatapova N.Ts. [On the porous structure of hybrid sorbent materials for air drying], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 299-305. (In Russ., abstract in Eng.)
35. Sergunin A.S., Simanenkova S.I., Gatapova N.Ts. [On deep air drying in relation to onboard oxygen-producing plants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 197-202. (In Russ., abstract in Eng.)
36. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Balashov V.A., Golovanchikov A.B. *Massoobmennyy apparat dlya elektrosorbtsionnykh protsessov* [Mass transfer apparatus for electrosorption processes], Russian Federation, 2020, Utility model to patent 195520. (In Russ.)
37. Merentsov N.A., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Balashov V.A., Golovanchikov A.B. *Massoobmennyy apparat nepreryvnogo deystviya* [Mass transfer apparatus of continuous action], Russian Federation, 2020, Utility model to patent 195503. (In Russ.)
38. Merentsov N.A., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Balashov V.A., Golovanchikov A.B. *Teplomassoobmennyy apparat* [Heat and mass transfer apparatus], Russian Federation, 2020, Utility model to patent 195502. (In Russ.)
39. Posternak N.V., Putin S.B., Simanenkova S.I., Gatapova N.Ts. [Methods of carbon dioxide concentration in the air regeneration system under conditions of long-term manned space flights], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 173-181. (In Russ., abstract in Eng.)
40. Putin S.B., Simonova D.L., Skvortsov S.A. [Mathematical modeling of the air regeneration process in a closed volume], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 953-956. (In Russ., abstract in Eng.)
41. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Tezikov D.A. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 055028.
42. Troitskiy V.M. [Phenomenological approach to the analysis of experimental data on gas permeability in porous media. The true cause of the Klinkenberg effect], *Vesti gazovoy nauki* [Lead Gas Science], 2017, no. 2 (30), pp. 110-124. (In Russ., abstract in Eng.)
43. Trebin G.F., Murav'yev I.M. [Ed.] *Fil'tratsiya zhidkostey i gazov v poristykh sredakh* [Filtration of liquids and gases in porous media], Moscow: Gostoptekhizdat, 1959, 157 p. (In Russ.)
44. Pykhachev G.B. *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics], Moscow: Gostoptekhizdat, 1961, 387 p. (In Russ.)
45. Merentsov N.A., Balashov V.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V. [The structure of the filtration curve and methods of its approximation. Part 2. Upper limit of application of Darcy's law], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 245-254, doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.245-254 (In Russ., abstract in Eng.)
46. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipiyashchim zernistym sloyem* [Hydraulic and thermal foundations of the work of devices with a stationary and boiling granular layer], Leningrad: Khimiya, 1968, 512 p. (In Russ.)

47. Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Obshchiy kurs* [Processes and apparatuses of chemical technology. General course], Moscow: Logos, Vysshaya shkola, 2014, 912 p. (In Russ.)

Die Struktur der Filtrationskurve und Methoden ihrer Approximation. Teil 3. Gleichungen zur Approximation der Filtrationskurve

Zusammenfassung: Es ist die Struktur der Filtrationskurve betrachtet, die in einer Vielzahl der Änderung der Filtrationsraten konstruiert ist. Eine detaillierte Beschreibung des Mechanismus des Auftretens und der Entwicklung der Trägheitskomponente der Filtrationsströmungsstruktur ist gegeben. Es sind Gleichungen vorgestellt, die verwendet werden können, um die Filtrationskurve anzunähern. Es ist eine modifizierte Gleichung vorgeschlagen, die einen glatten Übergang von laminarer zu turbulenter Filtration ohne Diskontinuitäten der Geschwindigkeits- und Druckfelder ermöglicht, die bei der Berechnung sowohl eindimensionaler als auch räumlicher Filtrationsströmungen verwendet werden kann.

Structure de la courbe de filtrage et moyens de son approximation. Partie 3. Équations pour l'approximation de la courbe de filtrage

Résumé: Est examinée la structure de la courbe de filtration, construite dans une large gamme de changements de vitesse de filtration. Est donnée une description détaillée du mécanisme de l'apparition et du développement de la composante inertielle de la structure du courant de filtration. Sont présentées les équations qui peuvent être utilisées pour approximer la courbe de filtrage. Est proposé d'utiliser une équation qui assure une transition en douceur de la filtration laminaire à la filtration turbulente sans rupture des champs de vitesse et de pression, qui peut être utilisée dans les calculs des courants de filtration unidimensionnels et ceux spatiaux.

Авторы: *Меренцов Николай Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Балашов Вячеслав Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; *Топилин Михаил Владимирович* – инженер 2-й категории лаборатории стандартных исследований керна, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть»; *Персидский Александр Владимирович* – ведущий инженер-конструктор, АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БАРОМЕМБРАННЫХ АППАРАТОВ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

С. И. Лазарев¹, О. В. Ломакина¹, В. Е. Буланов¹, И. В. Хорохорина²

*Кафедры: «Механика и инженерная графика» (1); lomakinaolga@mail.ru;
«Природопользование и защита окружающей среды» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: мембранный аппарат; напряженно-деформированное состояние; прочностные характеристики; расчетная схема; торообразные пластины.

Аннотация: Рассмотрены работы по методам расчета конструктивно-технологических параметров, проектированию мембранного оборудования, исследованиям технологических особенностей мембранных устройств, подбору расчетных схем, методов расчета на прочность и жесткость. Разработана методика расчета механических нагрузок и определения толщины пластин и торообразных оболочек мембранного аппарата комбинированного типа, позволяющая оценить прочностные свойства аппаратов данного класса. Приведен пример расчета, позволяющий оценить адекватность применения данной методики к аппаратам комбинированного типа.

Введение

За последние 25 лет развитие мембранной технологии значительно ускорилося. Усовершенствованию установок и аппаратов мембранного вида посвящено немало работ. Так, в работе [1] спроектирована, построена и испытана оригинальная лабораторная установка планарной геометрии мембранной дистилляции для будущего соединения с солнечной энергией. Несмотря на концептуальную простоту, оригинальная геометрия разработана для того, чтобы обеспечить многоступенчатую компоновку, компактность, внутреннюю рекуперацию тепла и возможную интеграцию с полимерным теплообменником для окончательного нагрева рассола с помощью солнечной энергии или отработанного тепла. Кроме того, исследовано влияние свободного воздушного зазора, проникаемого зазора и частичного вакуумного расположения воздушных зазоров.

Авторы в работе [2] предлагают метод многокритериальной оптимизации для определения режимных и геометрических параметров газоструйных аппаратов, приводят результаты расчетов двухступенчатой установки.

В статье [3] на основе концепции создания в аппарате направленного движения материальных потоков рассмотрена возможность интенсификации процессов смешивания сыпучих материалов за счет оптимизации конструкции аппарата. Приведены результаты экспериментальных исследований на модели центробежного смесителя с ротором в виде полого усеченного конуса с волнообразной верхней кромкой. Показано, что модернизация ротора обеспечивает повышение эффективности процесса смешивания в пересекающихся потоках сыпучего материала, позволяя повысить сглаживающую способность аппарата и интенсивность смешивания без дополнительных затрат энергии.

В статье [4] рассматриваются последние разработки по усовершенствованию конструкции мембранного модуля с помощью технологии 3D-печати. В настоящее время существуют стандарты проектирования и расчета прочности аппаратов высокого давления. Работа [5] содержит общую характеристику разработанных стандартов, рассматривает их структуру, подходы, методы расчета и проектирования, а также основные отличия от предыдущих нормативных документов. Авторы в [6] рассматривают вопросы, связанные с расчетом времени выделения пермеата из разделяемой системы при работе баромембранной установки с наиболее распространенным замкнутым контуром циркуляции. Инженерная методика расчета оптимальных конструктивных параметров фланца электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа показана в статье [7]. В работах [8 – 10] представлена конструкция электробаромембранного аппарата трубчатого типа для очистки технологических растворов, предложены модифицированные уравнения для теоретического расчета и прогнозирования производительности и качества процесса электронанофильтрации. Анализ напряженно-деформированного состояния, учитывающего преобразование формы конструкции путем складывания повторяющихся фрагментов в плоскости наименьшей жесткости, посвящена статья [11]. Также для анализа и моделирования напряженно-деформированного состояния различных элементов аппаратов часто прибегают к методу конечных элементов. Так, в работе [14] смоделирован процесс взаимодействия абразивной частицы и поверхности детали, проанализировано ее напряженно-деформированное состояние. Представлены результаты численных экспериментов, которые позволили установить, как распределяются эквивалентные пластические деформации при глубинах внедрения конуса 0,01 и 0,05 мм. Таким образом, авторы занимаются вопросами исследования технологических особенностей таких устройств, подбором расчетных схем, методов расчета на прочность и жесткость. В данной работе предложено оптимизировать конструкцию в целях снижения материальных затрат.

Выполненный обзор источников [1 – 11] по методам расчета конструктивно-технологических параметров и проектирования мембранного оборудования, позволил сформулировать цель работы – разработать перспективную конструкцию аппарата комбинированного типа, определить механические нагрузки на его части, выработать рекомендации по проектированию. Элементы конструкции аппарата (в первую очередь несущие крышки) должны удовлетворять не только требованиям эффективности и качества разделения и очистки растворов, но и условиям безопасной эксплуатации [12, 13]. Поэтому проектирование крышек аппаратов должно проводиться исходя из оптимальных конструктивных размеров (толщин круглых пластин, тороидальных оболочек и опорных колец).

Материалы и методы

Базовыми элементами корпуса данного аппарата являются верхняя и нижняя крышки. Они соединены между собой замковым байонетным кольцом (рис. 1). Исходя из того что крышки имеют одинаковые геометрические размеры, а их нагружение различается только на величину собственного веса, рассматривать будем лишь одну – верхнюю, расчетная схема которой представлена на рис. 2. Верхняя крышка находится под воздействием давления на круглую пластину со стороны плоскокамерного модуля и стенку торообразной оболочки со стороны трубчатого модуля. Показываем неизвестные внутренние усилия в сечениях: А–А (сопряжение оболочки и круглой пластины), В–В (оболочки и кольца), продольную силу T_{MB} , поперечные силы Q_A , Q_B , изгибающие моменты M_A .

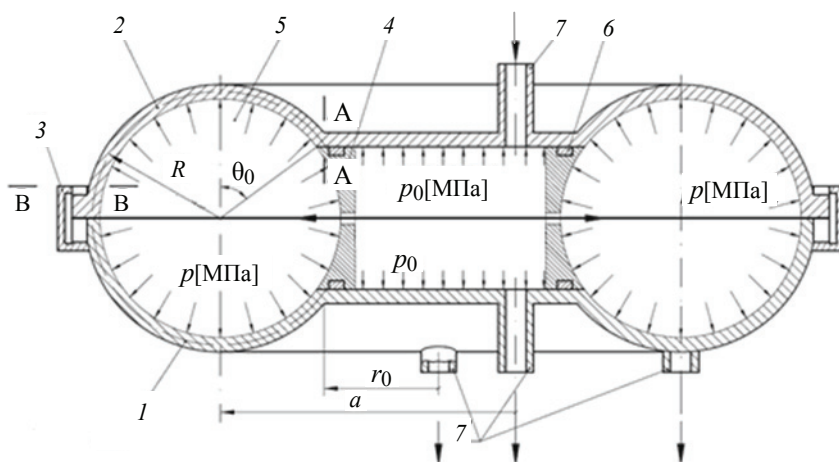


Рис. 1. Конструкция баромембранного аппарата:

1, 2 – крышки нижняя и верхняя соответственно; 3 – кольцо замковое байонетное; 4, 5 – плоскокамерный и трубчатый модули соответственно; 6 – уплотнение; 7 – входной и выходной патрубки

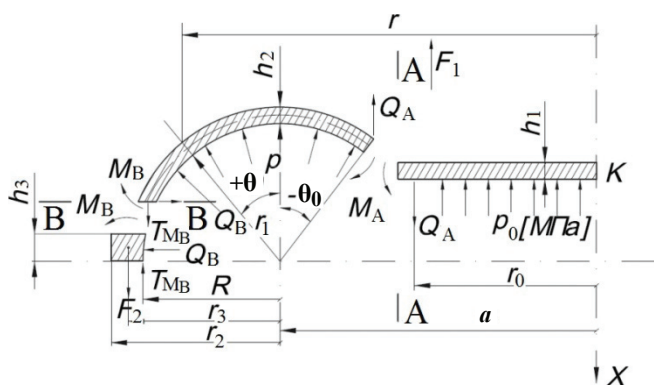


Рис. 2. Расчетная схема крышки

Данные усилия распределены по окружности и, за исключением T_{MB} , являются неизвестными. Они могут быть найдены из условия совместности деформаций.

Введем обозначения: N_θ^* , N_ϕ^* , Q^* , M_A^* – усилия, обусловленные действием давления p и осевой силы F ; R , a , r_0 – радиусы меридионального сечения тора, его круговой оси и круглой пластины соответственно; $F_1 = p_0 \pi r_0^2$ – осевая сила $\theta = \theta_1$; θ_0 – угол в месте сопряжения торообразной оболочки и круглой пластины; θ – переменный угол сечения оболочки; ϕ_B^k – угол поворота кольца; E , ν – модуль упругости материала оболочки и коэффициент Пуассона; $\vartheta_A^{пл}$ – угол поворота пластины; h_2 , h_3 – толщины оболочки и кольца соответственно; p_0 – давление на пластину; ξ_B^k – радиальное перемещение кольца; $D_1 = \frac{E h_1}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины; $N = p h_3(a+R) + Q_B(a+R)$ – кольцевое тангенциальное усилие; $M = P(a+r_3)^2 - T_{MB}(a+R)^2 + M_B(a+R) + Q_B(a+R) \frac{h_3}{2}$ – кольцевой

изгибающий момент; $F_2 = p_0 \pi r_0^2 + p \pi \left[(a+R)^2 - r_0^2 \right]$ – осевое усилие, приходящееся на кольцо при $\theta = \theta_0$; $\alpha = \frac{R}{a}$; $\lambda = \sqrt[6]{12(1-\nu^2)}(\alpha\beta)^{1/3}$; $\beta = \frac{R}{h_2}$; $T_{MB} = \frac{F_2}{2\pi(a+R)}$; $I_1 = h_3 \ln\left(\frac{a+r_2}{a+R}\right)$; $I_3 = \frac{h_3^3}{12} \ln\left(\frac{a+r_2}{a+R}\right)$ – геометрические характеристики кольцевого сечения.

Сечение А–А:

$$\left. \begin{aligned} u_A^* + \alpha_{11}(Q_A - Q_A^*) + \alpha_{12}(M_A - M_A^*) &= u_A^{\text{пл}}; \\ g_A^* + \alpha_{12}(Q_A - Q_A^*) + \alpha_{22}(M_A - M_A^*) &= -g_A^{\text{пл}} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Сечение В–В:

$$\left. \begin{aligned} u_B^* + \alpha_{11}(Q_B - Q_B^*) + \alpha_{12}(M_B - M_B^*) &= \xi_B^K; \\ g_B^* + \alpha_{12}(Q_B - Q_B^*) + \alpha_{22}(M_B - M_B^*) &= \varphi_B^K \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где радиальные и угловые перемещения оболочки $u_A^*, u_B^*, g_A^*, g_B^*$ в сечениях А–А и В–В, вызванные внутренним давлением p , определяются по формулам:

$$u^* = \frac{a(1 + \alpha \sin \theta)}{Eh_2} (N_\phi^* - \nu N_\theta^*);$$

$$g^* = -\sqrt{12(1-\nu^2)} \frac{F_1 \lambda}{2\pi E h_2^2} \varphi(\theta) \operatorname{Re}[-\lambda \omega(\theta)]; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} N_\theta^* &= \frac{pR}{2} \left[\frac{2 + \alpha \sin \theta}{1 + \alpha \sin \theta} - \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} \frac{2 + \alpha \sin \theta_0}{1 + \alpha \sin \theta_0} \right] + \\ &+ \frac{F_1}{2\pi\alpha} \frac{1}{\sin \theta (1 + \alpha \sin \theta)} - \frac{F_1}{2\pi\alpha} \frac{\phi(\theta) \cos \theta}{1 + \alpha \sin \theta} \left\{ \lambda I_m E[-\lambda \omega(\theta)] + \frac{1}{\omega(\theta)} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_\phi^* &= \frac{pR}{2} \left[1 + \frac{\sin \theta_0}{\alpha} \frac{2 + \alpha \sin \theta_0}{\sin^2 \theta} \right] - \frac{F_1}{2\pi r_1} \frac{1}{\sin^2 \theta} - \frac{F_1}{2\pi r_1} \times \\ &\times \left\{ -\lambda^2 \phi(\theta) \omega'(\theta) I_m E'[-\lambda \omega(\theta)] + \lambda \phi'(\theta) I_m E \left[-\lambda \omega(\theta) + \frac{\phi'(\theta)}{\omega(\theta)} - \frac{\phi(\theta) \omega'(\theta)}{\omega^2(\theta)} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q_B^* &= N_\theta^* \cos \theta - \frac{F_1 \lambda \sin^2 \theta}{2\pi a (1 + \alpha \sin \theta)} \left\{ I_m E[-\lambda \omega(\theta)] + \frac{1}{\lambda \omega(\theta)} \right\}, \\ M_\theta^* &= \frac{1}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} \frac{F_1 h_1 \lambda^2}{2\pi R} [\phi(\theta) \omega'(\theta) \operatorname{Re} E'[-\lambda \omega(\theta)]], \end{aligned} \quad (6)$$

$$M_\phi^* = \nu M_\theta^*.$$

Оболочку можно считать длинной, если выполняется неравенство

$$|\omega(\theta_2) - \omega(\theta_1)| > \frac{3,0}{\lambda}. \quad (7)$$

Для такого вида торообразной оболочки коэффициенты при M и Q в уравнениях (1), (2) определяются по формулам:

$$\alpha_{11} = \frac{a}{\alpha} \lambda \omega_0' (1 + \alpha \sin \theta_1)^2 + \frac{[\operatorname{Re} h_{10}]^2 + [I_m h_{10}']^2}{\operatorname{Re} h_{10} I_m h_{10}' - I_m h_{10} \operatorname{Re} h_{10}'} \frac{1}{E h_2}; \quad (8)$$

$$\alpha_{12} = -\sqrt{12(1 - \nu^2)} a (1 + \alpha \sin \theta_1) \frac{\operatorname{Re} h_{10} \operatorname{Re} h_{10}' + I_m h_{10} I_m h_{10}'}{\operatorname{Re} h_{10} I_m h_{10}' - I_m h_{10} \operatorname{Re} h_{10}'} \frac{1}{E h_2^2}; \quad (9)$$

$$\alpha_{22} = 12(1 - \nu^2) \frac{R}{\lambda \omega_0'} \frac{[\operatorname{Re} h_{10}]^2 + [I_m h_{10}]^2}{\operatorname{Re} h_{10} I_m h_{10}' - I_m h_{10} \operatorname{Re} h_{10}'} \frac{1}{E h_2^3}. \quad (10)$$

В справочнике [16] (табл. (1 – 5)) приведены значения функций $\varphi(\theta)$, $\omega(\theta)$, $\omega'(\theta)$, $\operatorname{Re} h_1$, $\operatorname{Re} h_1'$, $\operatorname{Re} [-\lambda \omega(\theta)]$, $I_m E [-\lambda \omega(\theta)]$, $I_m h_1$, $I_m h_1'$. Данные зависимости будут справедливы для случая, когда $\lambda^3 > 5$. Их можно получить, используя метод асимптотического интегрирования [14].

Угловые и линейные перемещения кольца и круглой пластины могут быть выражены:

$$\vartheta_A^{\text{пл}} = -\frac{p_0 r_0^3}{8 D_1 (1 + \nu)} + \frac{M_A r_0}{D_1 (1 + \nu)}; \quad u_A^{\text{пл}} = 0; \quad (11)$$

$$\xi_B^{\text{к}} = \frac{N}{E I_1} + \frac{\varphi h_3}{2}; \quad (12)$$

$$\varphi_B^{\text{к}} = \frac{M}{E I_3}. \quad (13)$$

Определяя неизвестные усилия в точках сопряжения оболочки, пластины и кольца M_A , Q_A , M_B , Q_B , найдем напряжения и деформации в любом сечении крышки:

– для круглой пластины:

$$\sigma_{\varphi \max} = \frac{6 M_{\varphi}}{h_1^2}; \quad (14)$$

$$\sigma_{r \max} = \frac{6 M_r}{h_1^2} = \nu \sigma_{\varphi \max}; \quad (15)$$

– для торообразной оболочки:

$$\sigma_{\theta \max} = \sigma_{\theta \max}^{(u)} + \sigma_{\theta \max}^{(p)} = \frac{6 M_{\theta}}{h_2^2} + \frac{1 + 0,5 \alpha \sin \theta}{1 + \alpha \sin \theta} \frac{p r_1}{h_2}; \quad (16)$$

$$\sigma_{\varphi \max} = \sigma_{\varphi \max}^{(u)} + \sigma_{\varphi \max}^{(p)} = \frac{6 M_{\varphi}}{h_2^2} + \frac{p r_1}{h_2}, \quad (17)$$

где $\sigma_{\theta \max}^{(p)}$, $\sigma_{\varphi \max}^{(p)}$ – растягивающие напряжения, найденные по безмоментной теории; $\sigma_{\theta \max}^{(u)}$, $\sigma_{\varphi \max}^{(u)}$ – напряжения от изгиба.

Максимальные нормальные напряжения в кольце

$$\sigma_{\max}^K = \frac{N}{(a+R)} + \frac{M h_3/2}{(a+R)I_3}. \quad (18)$$

Для наибольших напряжений и перемещений в торообразной оболочке используем формулы [15]:

– для случая $\theta_* = 0$

$$\sigma_{\phi}^p = \sigma_v 2,15(1-v^2)^{1/3} \alpha^{-1/3} \beta^{2/3} + \frac{pR}{h_2},$$

– в точке $\theta_* = \pm \frac{1,225}{\lambda}$

$$\sigma_{\theta} = \pm \sigma_v 2,99(1-v^2)^{-1/6} \alpha^{-1/3} \beta^{2/3} [\varphi(\theta_*) \omega'(\theta_*)] + \frac{1+0,5\alpha \sin \theta_*}{1+\alpha \sin \theta_*} \frac{pR}{h_2}, \quad (19)$$

где $\sigma_v = \frac{F_0}{2\pi a h_2}$; $F_0 = p\pi r_0^2 + p_0\pi(a^2 - r_0^2)$.

Рассчитать максимальное осевое перемещение в точке А ($\theta = \theta_1$) и максимальный прогиб в центре пластины можно по формулам:

$$\delta_A = u_{XA} = \frac{2}{\lambda^3} \frac{12(1-v^2)R^3}{4Eh_2^3 a} F_1; \quad (20)$$

$$u_K^{пл} = u_{xA} + \frac{(5+v)p_0 r_0^4}{(1+v)64D_1} + \frac{M_A r_0^2}{(1+v)2D_1}. \quad (21)$$

Условие прочности выразим (IV теория)

$$\sigma_{\Sigma}^{IV} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} \leq [\sigma], \quad (22)$$

а условие жесткости

$$u_{x \max} \leq [u_x], \quad (23)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в опасных точках крышки; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала крышки; $[u_x]$ – допускаемый прогиб для крышки в осевом направлении.

Результаты исследования

Рассмотрим расчетную схему торообразной оболочки (рис. 3). Во время рабочего процесса аппарата действует рабочее давление p_0 со стороны плоскокамерного модуля на круглую пластину, со стороны трубчатого модуля на стенки оболочки действует давление p , которое в своем максимальном значении составляет около трети от рабочего. Кроме зон закрепления оболочки, в которых возникают значительные напряжения, вызванные изгибным эффектом, учитывая тонкость оболочки ($\delta/R \leq 1/20$), можно принять, что напряжения, возникающие в оболочке, постоянны по толщине. В этом случае теория называется безмоментной.

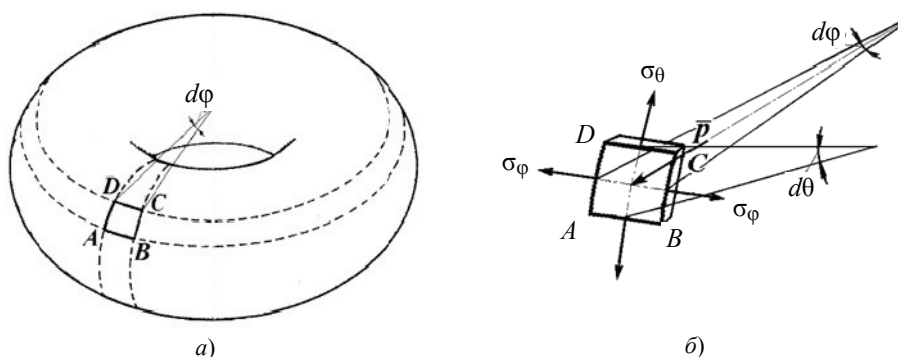


Рис. 3. Расчетная схема торообразной оболочки:
a – общий вид оболочки; *б* – схема загрузки элемента оболочки

Из оболочки (см. рис. 3, *a*) выделим двумя меридиональными плоскостями (то есть плоскостями, проходящими через ось вращения оболочки) с углом $d\varphi$ между ними и двумя плоскостями, перпендикулярными оси тора AB и CD , элемент $ABCD$.

Нормальные напряжения, действующие по граням AC и BD в направлении касательной к окружности, называются окружными напряжениями σ_φ ; действующие по граням AB и CD в меридиональном направлении – меридиональными напряжениями σ_θ . Кроме напряжений σ_φ и σ_θ на элемент оболочки перпендикулярно поверхности действует внутреннее избыточное давление p .

Уравнение, связывающее между собой данные величины, является основным в безмоментной теории оболочек и называется уравнением Лапласа

$$\frac{\sigma_\varphi}{r} + \frac{\sigma_\theta}{R} = \frac{p}{\delta}, \quad (24)$$

где r – расстояние до оси вращения; δ – толщина стенки тора.

Для рассматриваемой оболочки и при отсчете угла θ от вертикальной оси в [13] предлагаются следующие формулы:

– для наружной части тора ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$):

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{p}{2\delta} \left[\frac{(a + R \sin \theta)^2 - a^2}{(a + R \sin \theta) \sin \theta} \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{p}{\delta} \left[(a + R \sin \theta) - \frac{(a + R \sin \theta)^2 - a^2}{2R \sin \theta} \right]; \end{aligned} \quad (25)$$

– для внутренней части тора ($\theta_0 \leq \theta \leq 0^\circ$):

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{p}{2\delta} \left[\frac{a^2 - (a + R \sin \theta)^2}{(a + R \sin \theta) |\sin \theta|} \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{p}{\delta} \left[(a + R \sin \theta) + \frac{a^2 - (a + R \sin \theta)^2}{2R \sin \theta} \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Из условия статического равновесия оболочки, отсеченной цилиндрическим сечением радиуса a , учитывая, что кольцевые волокна при $\theta = 0^\circ$ не деформируются $\sigma_\theta = 0$, а σ_θ может быть найдена по выражению

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{\delta}, \quad (27)$$

для напряжений σ_ϕ предложена упрощенная формула

$$\sigma_\phi = pR \sin \frac{\theta}{2\delta}. \quad (28)$$

При проектном расчете с погрешностью до 5 % необходимая толщина торобразной оболочки может быть найдена:

– по меридиональным напряжениям

$$\delta \geq \left[\frac{pR}{\sigma_p} \right]; \quad (29)$$

– по окружным напряжениям

$$\delta \geq \frac{pR \sin \theta}{2[\sigma_p]}. \quad (30)$$

Из полученных величин выбирают большее значение.

При этом для сосудов и аппаратов, работающих под избыточным давлением, стандарт¹ рекомендует следующее условие прочности:

$$S \geq S_p + C, \quad (31)$$

где C – сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм; S_p – расчетная толщина стенки (в нашем случае $S_p = \delta$).

Расчет круглой пластины с отверстием, нагруженной внутренним давлением, проводится по формулам (32) – (34).

Расчетная толщина пластины

$$S_{1p} = KK_0 D \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}}. \quad (32)$$

Условие выполнения прочности пластины

$$S_1 \geq S_{1p} + C. \quad (33)$$

Значение коэффициента K определяется в зависимости от вида соединения частей крышки и для данного варианта соответствует значениям:

$$\frac{S-C}{S_1-C} \leq 0,5; \quad K = 0,41;$$

¹СТП 10-04-02 Расчет на прочность сосудов и аппаратов. Том 1. Расчет на прочность вертикальных и горизонтальных аппаратов // ООО НТП «Трубопровод». – М., 2005. – 190 с. – URL : <http://gostrf.com/normativ/1/4293842/4293842279.htm>

$$\frac{S-C}{S_1-C} \geq 0,5; K = 0,38.$$

Во всех случаях толщина круглой пластины должна быть больше или равна толщине торообразной части.

Значение коэффициента ослабления K_0 для пластин, имеющих одно отверстие:

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2}, \quad (34)$$

где d – диаметр отверстия.

Если неравенство $S_1 - CD \geq 0,11$ не выполняется, вводится поправочный коэффициент:

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \frac{S_1 - C}{D}\right)^2}}; \quad K_p = 2,21 + 1 + (6S_1 - CD)2.$$

Заключение

Необходимо учитывать, что прочностные характеристики стеклопластика во многом более высокие, чем у стали. Предел прочности (для металлов – предел текучести), МПа, составляет для стали – 240, алюминия – 50...440, стеклопластика – 800...1 700 [17], при этом следует учитывать, что является связующим веществом. Им могут быть полиэфирные, фенол-формальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические смолы, полиамиды, алифатические полиамиды, поликарбонаты и др. Выбор связующего вещества оказывает влияние на величину предела прочности стеклопластика.

Допускаемое избыточное внутреннее давление в торообразной части

$$[p] = \frac{[\sigma](S-C)}{R}. \quad (35)$$

Допускаемое давление на круглую пластину определяется по формуле

$$[p] = \left(\frac{S_1 - C}{KK_0 D}\right)^2 [\sigma]. \quad (36)$$

В дальнейшем рассчитанная величина допускаемого избыточного давления умножается на данный коэффициент.

Используя данные табл. 1, где дано сравнение физико-механических показателей различных материалов: ПА 6-210/310 ОСТ 6-06-С9-93 – полиамид марки ПА 6; ПА 66-ЛТО-СВ30 – полиамид марки ПА 66; Ст3 – сталь марки Ст3; ГСП-8 ГОСТ 17478-95 – гранулированный стекловолокнит (ГСП), изготовленный на основе комплексных стеклянных нитей, пропитанных модифицированным фенолоформальдегидным связующим, проведем расчет толщин крышек (табл. 2). Во всех случаях к этим величинам добавляется величина C .

Таблица 1

Сравнение физико-механических показателей различных материалов

Показатель	Материал			
	ПА 6-210/310 ОСТ 6-06-С9-93	ПА 66-ЛТО-СВ30	Ст3	ГСП-8 ГОСТ 17478–95
Плотность материала, г/см ³	1,13...1,14	1,36	7,8	1,85
Допускаемое напряжение, МПа:				
при растяжении	50	100	125	80
изгибе	60...70	190	140	160
Модуль нормальной упругости, ГПа	1,9...2,0	7,0	210	22,5
Ударная вязкость, кДж/м ²	5,0	23	784	65

Таблица 2

Расчет толщин крышек

Давление, МПа	Материал			
	ПА 6-210/310 ОСТ6-06-С9-93	ПА 66-ЛТО-СВ30	Ст3	ГСП-8 ГОСТ 17478–95
0,5	0,62/3,46	0,31/2,45	0,25/2,19	0,39/2,74
1	1,24/4,89	0,62/3,45	0,50/3,09	0,78/3,86
2	2,48/6,92	1,24/4,87	0,99/4,36	1,55/5,44
3	3,69/8,47	1,85/5,96	1,49/5,35	2,31/6,66
5	6,18/10,93	3,09/7,71	2,47/6,91	3,86/8,62
10	12,32/15,46	6,16/10,91	4,93/9,77	7,7/12,2

Примечание. В числителе приведены толщины тороидальной части, в знаменателе – круглой пластины.

Приведенная методика аналитического описания механического воздействия на элементы комбинированного аппарата и выполненный пример расчета торообразной оболочки и пластины позволяют оценить напряженно-деформированное состояние конструкции на прочность и жесткость. При нагружении комбинированного аппарата трансмембранным давлением позволило определить необходимые размеры оболочек и пластин для его проектирования и разработки.

Список литературы

1. Development of a Membrane Distillation Module for Solar Energy Seawater Desalination / A. Cipollina, M. G. Di Sparti, A. Tamburini, G. Micale // Chemical Engineering Research and Design. – 2012. – Vol. 90, Issue 12. – P. 2101 – 2121. doi:10.1016/j.cherd.2012.05.021
2. Многокритериальная оптимизация параметров газоструйных аппаратов / Т. А. Юсупов, В. М. Емельянов, А. М. Гумеров, А. И. Рудаков // Вестн. Казанского технологического ун-та. – 2003. – № 2. – С. 131 – 136.

3. Иванец, В. Н. Интенсификация процесса смешивания путем оптимизации конструкции аппарата / В. Н. Иванец, А. В. Сибиль // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. – 2010. – № 4 (316). – С. 66–67.
4. The Potential to Enhance Membrane Module Design with 3D Printing Technology / J.-Y. Lee, W. S. Tan, J. An [et al.] // Journal of Membrane Science. – 2016. – Vol. 499. – P. 480 – 490. doi:10.1016/j.memsci.2015.11.008
5. Volfson, B. New Russian National Standards on Pressure Vessel and Apparatus Design and Strength Calculation / B. Volfson // Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, 26 – 30 July, 2009, Prague, Czech Republic. – Prague, 2009. – Vol. 1. – P. 531 – 535. doi:10.1115/PVP2009-77840
6. Теоретические аспекты прогнозирования производительности баромембранных установок для разделения жидких полидисперсных систем / С. П. Бабе-нышев, С. А. Емельянов, В. Е. Жидков [и др.] // Научное обозрение. – 2012. – № 5. – С. 468 – 470.
7. Кочетов, В. И. Оптимизация конструктивных параметров фланца электро-баромембранного аппарата плоскокамерного типа / В. И. Кочетов, В. Ю. Попов // Механики XXI века. – 2012. – № 11. – С. 92 – 96.
8. Kovaleva, O. A. Development and Calculation of an Electrobaromembrane Apparatus for Purifying Process Solutions / O. A. Kovaleva, S. I. Lazarev, S. V. Kovalev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Т. 53, № 1-2. – С. 21 – 25. doi: 10.1007/s10556-017-0287-9
9. Improved Design of an Electrobaromembrane Apparatus and Calculation of the Parameters of the Housing Chamber when Subjected to the Effect of Excess Pressure / V. I. Kochetov, S. I. Lazarev, S. V. Kovalev [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Т. 54, № 1-2. – С. 82 – 86. doi: 10.1007/s10556-018-0443-x
10. Flat-Chamber Electrobaromembrane Apparatus with Improved Characteristics and its Calculation Method / S. I. Lazarev, S. V. Kovalev, O. A. Kovaleva [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Т. 55, № 1-2. – С. 114 – 121. doi: 10.1007/s10556-019-00590-0
11. Gaydzhurov, P. P. Study of Stress-Strain States of a Regular Hinge-Rod Constructions with Kinematically Oriented Shape Change / P. P. Gaydzhurov, E. R. Iskhakova, N. G. Tsaritova // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 38 – 47. doi: 10.22337/2587-9618-2020-16-1-38-47
12. Соловьев, А. Н. Метод конечных элементов в моделировании центробежно-ротационной обработки / А. Н. Соловьев, М. А. Тамаркин, Н. В. Тхо // Advanced Engineering Research. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 214 – 220. doi: 10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220
13. Бояршинов, С. В. Основы строительной механики машин : учеб. пособие / С. В. Бояршинов. – М. : Машиностроение, 1973. – 456 с.
14. Геворкян, Р. С. Асимптотические решения связанных динамических задач термоупругости для анизотропных в плане неоднородных тороидальных оболочек / Р. С. Геворкян // International Scientific and Practical Conference World Science. – 2016. – Vol. 1, No. 9 (13). – P. 14 – 29.
15. Легостаев, В. Л. Методика расчета торообразных оболочек по безмоментной и моментной теориям прочности / В. Л. Легостаев, Е. Д. Мордовин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 3. – С. 795 – 801.
16. Прочность, устойчивость, колебания : справ. : в 3 т. / Под общ. ред. И. А. Биргера, А. Я. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – Т. 1. – 831 с.
17. Сравнительная характеристика свойств стеклопластика, стали и алюминиевых сплавов. – Текст : электронный // Аквапром : офиц. сайт. – URL : <http://www.aquaprom24.ru/upload/shss-new.pdf> (дата обращения: 22.03.2021).

To the Question of Designing Baromembrane Combined Type Apparatus

S. I. Lazarev¹, O. V. Lomakina¹, V. E. Bulanov¹, I. V. Khorokhorina²

Departments of Mechanics and Engineering Graphics (1), lomakinaolga@mail.ru;
Nature Management and Environmental Protection (2), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: membrane apparatus; stress-strain state; strength characteristics; calculation scheme; toroidal plates.

Abstract: The paper considers works on methods for calculating design and technological parameters, design of membrane equipment, research of technological features of membrane devices, selection of design schemes, methods for calculating strength and stiffness. A method has been developed for calculating mechanical loads and determining the thickness of plates and toroidal shells of a membrane apparatus of the combined type, which makes it possible to assess the strength properties of apparatus of this class. An example of a calculation, which makes it possible to assess the adequacy of the application of this technique to devices of the combined type, is given.

References

1. Cipollina A., Di Sparti M.G., Tamburini A., Micale G. Development of a Membrane Distillation Module for Solar Energy Seawater Desalination, *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, vol. 90, issue 12, pp. 2101-2121, doi: 10.1016/j.cherd.2012.05.021
2. Yusupov T.A., Yemel'yanov V.M., Gumerov A.M., Rudakov A.I. [Multi-criteria optimization of the parameters of gas-jet devices], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2003, no. 2, pp. 131-136. (In Russ.)
3. Ivanets V.N., Sibil' A.V. [Intensification of the mixing process by optimizing the design of the apparatus], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Food technology], 2010, no. 4 (316), pp. 66-67. (In Russ.)
4. Lee J.-Y., W. S. Tan, J. An [et al.] The Potential to Enhance Membrane Module Design with 3D Printing Technology, *Journal of Membrane Science*, 2016, vol. 499, pp. 480-490, doi:10.1016/j.memsci.2015.11.008
5. Volfson B. New Russian National Standards on Pressure Vessel and Apparatus Design and Strength Calculation, Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, 26 - 30 July, 2009, Prague, Czech Republic, 2009, vol. 1, pp. 531-535, doi:10.1115/PVP2009-77840
6. Babenyshev S.P., Yemel'yanov S.A., Zhidkov V.Ye., Mamay D.S., Utkin V.P. [Theoretical aspects of forecasting the performance of baromembrane installations for the separation of liquid polydisperse systems], *Nauchnoye obozreniye* [Scientific Review], 2012, no. 5, pp. 468-470. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kochetov V.I., Popov V.Yu. [Optimization of the design parameters of the flange of the flat-chamber electro-baromembrane apparatus], *Mekhaniki XXI veku* [Mechanics of the XXI century], 2012, no. 11, pp. 92-96. (In Russ.)
8. Kovaleva O.A., Lazarev S.I., Kovalev S.V. Development and Calculation of an Electrobaromembrane Apparatus for Purifying Process Solutions, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, vol. 53, no. 1-2, pp. 21-25, doi: 10.1007/s10556-017-0287-9
9. Kochetov V.I., Lazarev S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Strel'nikov A.E. Improved Design of an Electrobaromembrane Apparatus and Calculation of the Parameters of the Housing Chamber when Subjected to the Effect of Excess Pressure, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, no. 1-2, pp. 82-86, doi: 10.1007/s10556-018-0443-x
10. Lazarev S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Rodionov D.A., Lazarev D.S., Kononov D.N. Flat-Chamber Electrobaromembrane Apparatus with Improved Characteristics and its Calculation Method, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 1-2, pp. 114-121, doi: 10.1007/s10556-019-00590-0

11. Gaydzhurov P.P., Iskhakova E.R., Tsaritova N.G. Study of Stress-Strain States of a Regular Hinge-Rod Constructions with Kinematically Oriented Shape Change, *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 38-47, doi: 10.22337/2587-9618-2020-16-1-38-47
12. Solov'yev A.N., Tamarkin M.A., Tkho N.V. [The finite element method in modeling centrifugal-rotary processing], *Advanced Engineering Research*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 214-220, doi: 10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220 (In Russ.)
13. Boyarshinov S.V. *Osnovy stroitel'noy mekhaniki mashin: uchebnoye posobiye* [Fundamentals of building mechanics of machines: textbook], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 456 p. (In Russ.)
14. Gevorkyan R.S. [Asymptotic solutions of coupled dynamic problems of thermoelasticity for anisotropic inhomogeneous toroidal shells], *International Scientific and Practical Conference World Science*, 2016, vol. 1, no. 9 (13), pp. 14-29. (In Russ.)
15. Legostayev V.L., Mordovin Ye.D. [Methodology for calculating toroidal shells by momentless and moment theories of strength], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 3, pp. 795-801. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Birger I.A., Panovko A.Ya. [Eds.] *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya: spravochnik: v 3 t.* [Strength, stability, fluctuations: reference book: in 3 vols.], Moscow: Mashinostroyeniye, 1968, vol. 1, 831 p. (In Russ.)
17. <http://www.aquaprom24.ru/upload/shss-new.pdf> (accessed 22 March 2021).

Zur Frage der Gestaltung der Bar-Membranen-Kombigeräte

Zusammenfassung: Der Beitrag betrachtet Arbeiten zu Methoden der Berechnung von technologischen und Konstruktionsparametern, Konstruktion von Membrananlagen, Erforschung technologischer Eigenschaften von Membranvorrichtungen, Auswahl von Konstruktionsschemata, Methoden zur Berechnung von Festigkeit und Steifigkeit. Es ist ein Verfahren zur Berechnung mechanischer Belastungen und zur Bestimmung der Dicke von Platten und torusförmigen Schalen einer Membranvorrichtung des kombinierten Typs entwickelt, das es ermöglicht, die Festigkeitseigenschaften von Vorrichtungen dieser Klasse zu bewerten. Es wird ein Berechnungsbeispiel gegeben, das es ermöglicht, die Angemessenheit der Anwendung dieser Technik auf kombinierte Geräte zu bewerten.

Sur la question de la conception des appareils baromembranes du type combiné

Résumé: Sont examinés les travaux sur les méthodes du calcul des paramètres structurels et technologiques, la conception de l'équipement à membrane, les recherches sur les caractéristiques technologiques des dispositifs à membrane, la sélection des schémas de calcul, les méthodes du calcul de la résistance et de la rigidité. Est élaborée la méthode du calcul des charges mécaniques et de détermination de l'épaisseur des plaques et des enveloppes toriques de l'appareil à membrane du type combiné permettant d'évaluer les propriétés de résistance des appareils de cette classe. Est cité un exemple de calcul permettant d'évaluer l'adéquation de l'application de cette technique aux appareils du type combine.

Авторы: *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; *Ломакина Ольга Владимировна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Буланов Владимир Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Хорохорина Ирина Владимировна* – доктор технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВЫЕ ВАКУУМ-НАСОСЫ ДЛЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Д. В. Никитин¹, Ю. В. Родионов¹, М. А. С. Махмуд¹,
А. И. Скоморохова², А. Н. Пахомов³, А. С. Зорин⁴

*Кафедры: «Механика и инженерная графика» (1), rodionow.u.w@rambler.ru;
«Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (2);
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (3),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
ООО «3-лайн» (4), г. Рассказово, Тамбовская обл., Россия*

Ключевые слова: жидкостнокольцевой вакуум-насос; материальный баланс; тепловой баланс; теплообмен.

Аннотация: Рассмотрен расчет жидкостнокольцевого вакуум-насоса на примере процесса сушки различных материалов. Установлено, что для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки экономически эффективно применять двухступенчатый жидкостнокольцевой вакуум-насос с возможностью отключения второй ступени. Представлена методика расчета удельной мощности одноступенчатого и двухступенчатого жидкостнокольцевых вакуум-насосов с учетом тепломассопереноса и тепловых процессов, возникающих во время работы.

Введение

Жидкостнокольцевые вакуум-насосы (ЖВН) представляют собой механические машины прямого вытеснения, которые могут работать в режиме как вакуумного компрессора, так и вакуумного насоса. Основной технической характеристикой ЖВН, определяющей область применения, является устойчивый диапазон предельного давления разряжения (вакуума). По данной характеристике ЖВН разделяют на одноступенчатые, двухступенчатые и жидкостно-пластинчатые вакуум-насосы (ЖПВН) [1 – 3], которые имеют ряд важных достоинств, таких как надежность эксплуатации, достаточная простота конструкции и невысокий уровень шума в процессе работы. По сравнению с поршневыми и ротационными вакуумными насосами и компрессорами ЖВН имеют следующие преимущества: сжатие с малым показателем политропы; низкие производственные затраты; способность работать с горючими и взрывоопасными газами [4, 5].

Жидкостнокольцевые вакуум-насосы широко используют в процессах переработки и для транспортирования различных материалов (полимеры, растительное сырье и др.) [6 – 9]. В зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик выбирается конструкция насоса. Показателем эффективности, определяющим работу ЖВН, является температурный режим рабочей жидкости. Это обосновано тем, что при нагнетании происходит процесс интенсивного отвода тепла от газа к рабочей жидкости, сопровождающийся ее нагревом. Поэтому при проектировании насосов необходимо значительное внимание уделять именно

тепловым явлениям, возникающим при работе ЖВН. Окончательный выбор типа и размера насоса осуществляется по величине удельной мощности, зависящей от необходимой для конкретной задачи скорости действия (производительности).

Одним из наиболее важных тепломассообменных процессов, в которых используется ЖВН, является сушка различных материалов.

Цель статьи – разработка методики расчета удельной мощности двухступенчатого ЖВН с возможностью отключения второй ступени при работе как на одной, так и двух ступенях для процессов сушки с учетом влияния тепловых процессов, происходящих в насосе и сушильной установке.

Методика и методы

Для исследования характеристик ЖВН, расчета удельной мощности и давления разрежения при различных тепломассообменных и тепловых процессах пользуемся базовыми литературными источниками [1, 3 – 5, 10 – 14], а также книгами по термодинамике, теплопередаче и механике жидкости. Для изучения особенностей протекания процессов сушки использованы работы [6 – 8, 15 – 19].

Рассмотрим процесс двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки (ДКВИС), которая эффективна для материалов с большим содержанием влаги. Она позволяет проводить процесс при невысоких температурах, ограничивающих денатурацию (разложение) важных химических элементов высушиваемого сырья [15 – 18].

В конструкции ДКВИС с рециркуляцией рабочей жидкости для поддержания нормальной работы насоса первая ступень выполнена в виде сушилки с закрученным слоем, после которой предусматриваются дополнительные емкости для предварительных сухих импульсов, необходимых для раскрытия капилляров материала с целью лучшего извлечения влаги. Их внедрение снижает время сушки второй ступени на 10 – 15 % [19].

Конвективная вакуум-импульсная сушильная установка второй ступени состоит из сушильного шкафа 2, в котором расположены лотки с высушиваемым сырьем, на базе двухступенчатого ЖВН 17, привод которого осуществляется от электродвигателя 18 (рис. 1).

Во время процесса сушки лотки с материалом подвергаются равномерному обдуву. Сушильным агентом выступает атмосферный воздух, нагретый с помощью калорифера 11. Регулируемые вентили 3 – 5, 7, 8, 10, 16, 20 – 24 необходимы для контроля процесса сушки. Термопара 1 позволяет проводить контроль температуры высушиваемого материала. По окончании продувки предусмотрено автоматическое переключение на режим вакуумирования для проведения вакуумной сушки.

Параметры, необходимые для расчета сушильных установок, находят на основе материального и теплового балансов с учетом общего количества энергии, которая необходима для нагрева материала, по методикам, подробно изложенным в работах [19, 20]. После анализа материального и теплового балансов определяется количество испаренной влаги на каждой из ступеней, исходя из которого находится расход воздуха. По величине испаренной влаги определяется производительность сушильной установки.

Секундный тренд иллюстрирует влияние образовавшегося пара на изменение давления в объеме вакуум-импульсной сушилки (рис. 2). После падения температуры и поднятия давления происходит периодическое повторение фаз.

В процессе сушки ЖВН используется при работе обеих ступеней для фазы сушки сельскохозяйственных растительных материалов под вакуумом. На первой ступени обеспечивается нагрев до температуры выше температуры кипения под вакуумом, но ниже температуры, приводящей к потере важных химических элементов материала. Выбор конструкции и типоразмера ЖВН определяется составом сырья и скоростью действия насоса по сухому материалу.

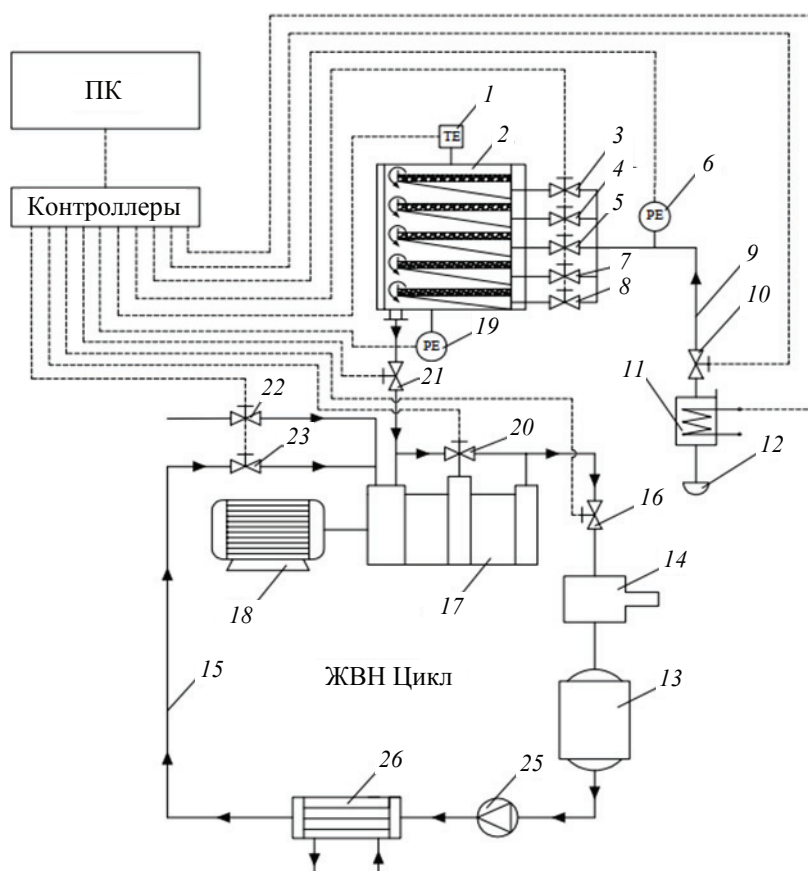


Рис. 1. Конвективная вакуум-импульсная сушильная установка второй ступени:
 1 – термопара; 2 – сушильный шкаф; 3 – 5, 7, 8, 10, 16, 20 – 24 – вентили; 6, 19 – вакуумметры; 9, 15 – трубопроводы; 11 – калорифер; 12 – воздуходувка; 13 – емкость; 14 – разделитель газовой и жидкой фаз; 17 – двухступенчатый ЖВН с возможностью отключения второй ступени; 18 – электродвигатель; 25 – водяной насос; 26 – теплообменник для охлаждения рабочей жидкости

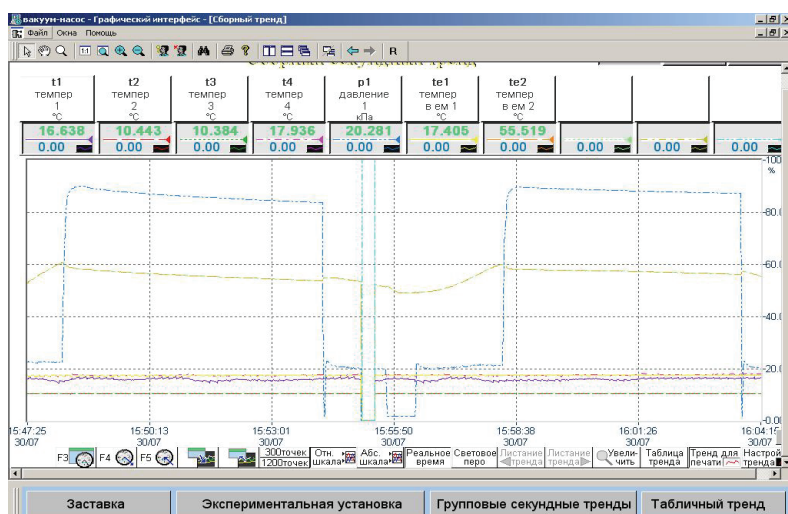


Рис. 2. Интерфейс программы «КРУГ-2000»

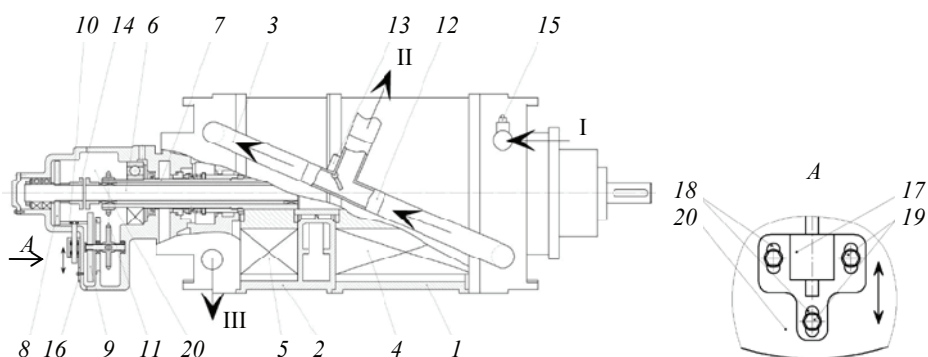


Рис. 3. Схема двухступенчатого жидстотнокольцевого вакуум-насоса с возможностью отключения второй ступени:

1, 2 – корпуса первой и второй ступеней соответственно; 3 – патрубок; 4, 5 – рабочие колеса первой и второй ступеней соответственно; 6 – вал первой ступени; 7 – полый вал второй ступени; 8, 9 – диски; 10 – промежуточный ролик; 11 – цепная передача; 12 – тройник; 13, 14 – электромагнитные заслонка и муфта соответственно; 15 – датчик; 16 – механизм регулировки; 17 – корпус подшипников; 18 – пазы; 19 – винты; 20 – корпус передачи; I–II и II–III – движение газовой фазы при работе на одной и двух ступенях соответственно

Исходя из экспериментальных наблюдений, для высушивания материала под вакуумом требуется двухступенчатый ЖВН, в то время как для продувки достаточно применять одноступенчатую конструкцию. Это обуславливает целесообразность с экономической точки зрения применения двухступенчатого ЖВН с возможностью отключения второй ступени [10, 21, 22] на режиме продувки (рис. 3).

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, основным критерием температуры нагрева материала является сохранение необходимых элементов, важных для использования высушиваемого материала по назначению. На основе данного требования разрабатывается последовательность и режимные параметры процесса. Выдержка высушиваемого материала под вакуумом интенсифицирует сушку за счет кипения при щадящих температурах. Зависимость температуры кипения от давления разряжения определяется по таблице или графику [11].

Удельную мощность на валу ЖВН представим в виде

$$N_{уд} = \frac{N_e}{S_d}, \quad (1)$$

где N_e – полная эффективная мощность ЖВН, кВт; S_d – действительная быстрота действия, м³/с.

При работе только на первой ступени эффективная мощность равна

$$N_e = N_{e1}, \quad (2)$$

где N_{e1} – эффективная мощность первой ступени, кВт.

Полная эффективная мощность двухступенчатого ЖВН

$$N_e = N_{e1} + N_{e2}, \quad (3)$$

где N_{e2} – эффективная мощность второй ступени, кВт.

В свою очередь величина эффективной мощности определяется при работе в двух режимах ЖВН:

– одноступенчатого

$$N_{e1} = N_{сж1} + N_{Г1} + N_{ТР}, \quad (4)$$

где $N_{сж1}$ – мощность, которая требуется для сжатия парогазовой смеси в первой ступени, кВт; $N_{Г1}$ – мощность, необходимая для перемещения жидкостного кольца первой ступени, кВт; $N_{ТР}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление трения в сальниках и подшипниках, кВт;

– двухступенчатого

$$\left. \begin{aligned} N_{e1} &= N_{сж1} + N_{Г1} + N_{ТР} \\ N_{e2} &= N_{сж2} + N_{Г2} + N_{ТР} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $N_{сж2}$ – мощность, которая требуется для сжатия парогазовой смеси во второй ступени, кВт; $N_{Г2}$ – мощность, требуемая для перемещения жидкостного кольца второй ступени, кВт.

Мощность сжатия $N_{сж}$ ЖВН определяется:

– для одноступенчатого

$$N_{сж1} = p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{\tau_1^{\frac{m_{ср}-1}{m_{ср}}}}{\tau_1^{\frac{m_{ср}-1}{m_{ср}}} - 1} \right], \quad (6)$$

где p_1 – давление всасывания первой ступени, кПа; S_1 – быстрота действия первой ступени, м³/с; τ_1 – внутренняя степень сжатия первой ступени; $m_{ср}$ – показатель политропы (принимается равным в пределах $m_{ср} = 1,05 \div 1,1$) [11];

– двухступенчатого

$$\left. \begin{aligned} N_{сж1} &= p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{\tau_1^{\frac{m_{ср}-1}{m_{ср}}}}{\tau_1^{\frac{m_{ср}-1}{m_{ср}}} - 1} \right] \\ N_{сж2} &= p_2 S_2 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{\tau_2^{\frac{m_{ср}-1}{m_{ср}}}}{\tau_2^{\frac{m_{ср}-1}{m_{ср}}} - 1} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где p_2 – давление всасывания второй ступени, кПа; S_2 – быстрота действия второй ступени, м³/с; τ_2 – внутренняя степень второй ступени.

Внутренняя степень сжатия ЖВН:

– одноступенчатого

$$\tau_1' = \frac{p_{сж1}}{p_1} = \frac{V_{\max 1}}{V_{\min 1}}, \quad (8)$$

где $p_{сж1}$ – давление сжатия первой ступени, кПа; $V_{\max 1}$, $V_{\min 1}$ – объемы рабочей ячейки первой ступени соответственно до процесса сжатия и после него, м³;

– двухступенчатого

$$\left. \begin{aligned} \tau_1' &= \frac{p_{сж1}}{p_1} = \frac{V_{\max 1}}{V_{\min 1}} \\ \tau_2' &= \frac{p_{сж2}}{p_2} = \frac{V_{\max 2}}{V_{\min 2}} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $p_{сж2}$ – давление сжатия второй ступени, кПа; $V_{\max 2}$, $V_{\min 2}$ – объемы рабочей ячейки второй ступени соответственно до процесса сжатия и после него, м^3 .

Для определения изменения давления газа в рабочей полости по углу поворота рабочего колеса воспользуемся расчетами процесса сжатия и законами термодинамики переменной массы [14, 23]

$$\frac{dP^\Gamma}{d\varphi} = \frac{k-1}{\omega V^\Gamma} \left[\omega \frac{dQ}{d\varphi} + P(G_I^\Gamma + G_{II}^\Gamma + G_{ок}^\Gamma) - i(G_{ут.I}^\Gamma + G_{ут.II}^\Gamma) - \frac{k}{k-1} \omega P^\Gamma \frac{dV^\Gamma}{d\varphi} \right], \quad (10)$$

где φ – угловая координата рабочего колеса, рад; k – температурный критерий; ω – угловая скорость, с^{-1} ; V^Γ – объем газовой полости, м^3 ; dQ – тепло, передаваемое газу в рабочей полости, Дж; $G_{ок}^\Gamma$ – количество газа, находящегося в рабочей полости при полном отсечении наружной кромки окна всасывания, кг; G_I^Γ , $G_{ут.I}^\Gamma$ – количество газа, перетекающего по торцевым зазорам между лопатками и лобовинами из ячейки в ячейку, кг/с; G_{II}^Γ , $G_{ут.II}^\Gamma$ – количество газа, перетекающего по торцевым зазорам между втулкой рабочего колеса и лобовинами со стороны сжатия на сторону всасывания, кг/с; P – полная удельная энергия присоединяемых элементов, Дж/кг; i – полная удельная энергия газа в рабочей полости, Дж/кг.

Когда ЖВН работает в режиме, при котором давление нагнетания больше давления сжатия $p_n > p_{сж}$, мощность сжатия будет определяться следующим образом:

– для одноступенчатого

$$N_{сж1} = p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{\frac{m_{ср} - 1}{\tau_1'^{m_{ср}}} - 1 \right] \alpha', \quad (11)$$

где α' – коэффициент, учитывающий сжатие обратного потока газовой фазы;

– двухступенчатого:

$$\left. \begin{aligned} N_{сж1} &= p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{\frac{m_{ср} - 1}{\tau_1'^{m_{ср}}} - 1 \right] \\ N_{сж2} &= p_2 S_2 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{\frac{m_{ср} - 1}{\tau_2'^{m_{ср}}} - 1 \right] \alpha' \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

Мощность N_Γ , которая затрачивается на перемещение жидкостного кольца, определяется как сумма мощностей потерь в безлопаточном пространстве $N_{бл}$ и рабочем колесе N_k .

Мощности $N_{бл}$ в режиме работы одноступенчатого и двухступенчатого ЖВН определяются соответственно по формулам:

$$N_{бл1} = M_1 \frac{\omega_1}{1000}; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{бл1} &= M_1 \frac{\omega_1}{1000} \\ N_{бл2} &= M_2 \frac{\omega_2}{1000} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где M_1, M_2 – моменты, возникающие от силы трения жидкости в безлопаточном пространстве соответственно первой и второй ступеней, Н·м; ω_1, ω_2 – угловые скорости рабочего колеса соответственно первой и второй ступеней, с^{-1} .

Скорость жидкости по углу поворота рабочего колеса ϕ с достаточной степенью точности можно определить с помощью численного моделирования [12].

Мощности, затрачиваемые на потери в рабочем колесе N_k при работе в режимах одноступенчатого и двухступенчатого ЖВН равны соответственно:

$$N_{k1} = Q_{ж1} H_{T1} (1 - \eta_{k1} k_\eta) \frac{\rho_{ж}}{1000}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{k1} &= Q_{ж1} H_{T1} (1 - \eta_{k1} k_\eta) \frac{\rho_{ж}}{1000} \\ N_{k2} &= Q_{ж2} H_{T2} (1 - \eta_{k2} k_\eta) \frac{\rho_{ж}}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $Q_{ж1}, Q_{ж2}$ – расходы рабочей жидкости на первой и второй ступенях через рабочее колесо, кг/с; H_{T1}, H_{T2} – теоретические напоры рабочего колеса первой и второй ступеней, м; η_{k1}, η_{k2} – КПД рабочего колеса первой и второй ступеней; k_η – коэффициент, учитывающий работу вакуум-насоса на жидкостях, имеющих вязкость больше вязкости воды; $\rho_{ж}$ – плотность рабочей жидкости, кг/м^3 .

Мощность $N_{тр}$, которая учитывает потери в подшипниках и сальниках, не превышает 1–2 % от полной эффективной мощности N_e насоса.

Предложенная методика позволяет определять эффективную мощность ЖВН модульного типа, работающего только на первой ступени или на двух одновременно различной быстроты действия. Данный расчет учитывает параметры газовой фазы и свойства рабочей жидкости.

Для определения действительной быстроты действия двухступенчатого ЖВН модульного типа воспользуемся следующей формулой [11]:

$$S_{д2} = S_{д1} \lambda_{п2}, \quad (17)$$

где $S_{д1}$ – действительная быстрота действия первой ступени, $\text{м}^3/\text{с}$; $\lambda_{п2}$ – коэффициент, учитывающий потери во второй ступени.

Действительная быстрота действия первой ступени определяется теоретической быстротой действия с учетом потерь в первой ступени

$$S_{д1} = S_{T1} \lambda_{п1}, \quad (18)$$

где S_{T1} – теоретическая быстрота действия первой ступени, $\text{м}^3/\text{с}$; $\lambda_{п1}$ – коэффициент подачи первой ступени, учитывающий возникающие потери.

Коэффициент подачи запишем следующим образом:

$$\lambda_{п1} = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3, \quad (19)$$

где λ_1 – коэффициент потерь быстроты действия вследствие переноса газовой фазы со стороны нагнетания на сторону всасывания; λ_2 – коэффициент потерь вследствие перетечек газовой фазы через торцевые зазоры между ячейками; λ_3 – коэффициент потерь из-за испарения жидкости в рабочие ячейки.

Коэффициент λ_1 определяется по формуле

$$\lambda_1 = \frac{V_{м.31} z_1}{\pi(r_{22}^2 - r_1^2) b_1 \psi}, \quad (20)$$

где $V_{м.31}$ – объем «мертвой зоны» первой ступени, м^3 (рис. 4); z_1 – число лопаток рабочего колеса первой ступени; r_{22} – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца, м ; r_1 – радиус ступицы рабочего колеса, м ; b_1 – ширина рабочего колеса первой ступени, м ; ψ – коэффициент для учета уменьшения величины объема рабочей ячейки из-за толщины лопаток рабочего колеса;

Эффект мертвой зоны практически полностью исключается у ЖВН с регулируемым нагнетательным окном [24] и вакуум-насосом с кинематически замкнутым корпусом и рабочим колесом [25].

Вследствие перетечек газовой фазы через торцевые зазоры между ячейками происходят потери действительной быстроты действия, учитывающиеся коэффициентом λ_2 [11, 26]. Для устранения торцевых потерь необходимо изменение конструктивной схемы подвода и отвода газовой фазы и дополнительно жидкости в ЖВН.

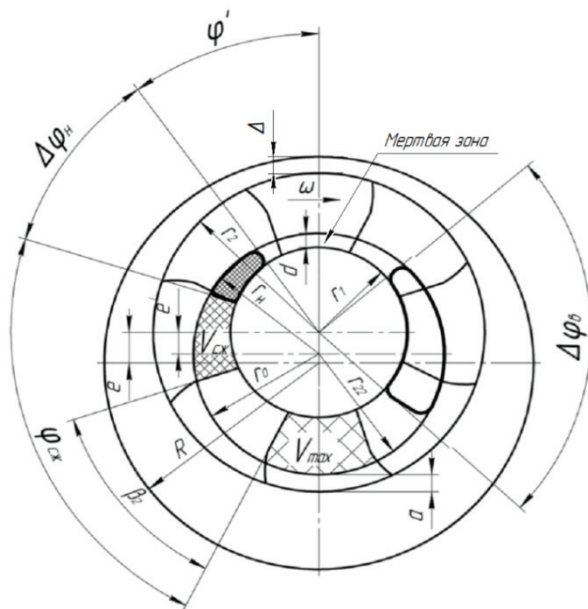


Рис. 4. Схема нагнетательного окна:

ϕ' – угол закрытия нагнетательного окна, рад; $\Delta\phi_n$ – угловая координата окна нагнетания, рад; $\phi_{сж}$ – угол поворота рабочего колеса, соответствующий зоне сжатия, рад; $\Delta\phi_v$ – угловая координата окна всасывания, рад; Δ – наименьший зазор между рабочим колесом и корпусом насоса, м ; ω – угловая скорость вращения рабочего колеса, с^{-1} ; r_2 – внешний радиус лопаток рабочего колеса, м ; r_n – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца в зоне нагнетания; r_0 – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца в произвольном сечении, м ; $V_{сж}$ – объем минимальной ячейки сжатия, м^3 ; V_{max} – объем максимальной ячейки, м^3 ; R – радиус корпуса насоса, м ; d – минимальное расстояние жидкостного кольца от втулки рабочего колеса, м ; e – эксцентриситет рабочего колеса относительно корпуса насоса, м ; e' – эксцентриситет жидкостного кольца относительно рабочего колеса, м ; a – величина погружения лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо, м ; β_2 – угол между лопатками рабочего колеса, рад.

Потери на испарение жидкости в рабочие ячейки учитываются коэффициентом λ_3 [12]

$$\lambda_3 = \frac{V_{\text{исп}} z_1}{\pi(r_{22}^2 - r_1^2) b_1 \psi}, \quad (21)$$

где $V_{\text{исп}}$ – объем испарившейся жидкости, м^3 .

Тепло, передаваемое газу в рабочей полости ЖВН, рассчитывается как сумма теплоты от конденсирующегося пара, испарившейся жидкости, теплопередачи конвекцией между поверхностью жидкости и газа и элементами рабочего колеса, а также теплообмена вследствие излучения между газом, поверхностью жидкостного кольца и элементами рабочего колеса. Некоторое количество теплоты выделяется в процессе сжатия [14]. Для первой ступени уравнение суммарной теплоты будет иметь вид

$$dQ = dQ_{u1} + dQ_{k1} + dQ_{\text{кон}1} + dQ_{\text{л}1} + dQ_{\text{р.с}1}, \quad (22)$$

где dQ_{u1} , dQ_{k1} , $dQ_{\text{кон}1}$, $dQ_{\text{л}1}$ – количество теплоты, Дж, выделяемой соответственно испарившейся жидкостью, конденсирующимся паром, конвективным теплообменом, лучистым теплообменом; $dQ_{\text{р.с}1}$ – количество теплоты, полученное в процессе сжатия, Дж.

Аналогично вычисляется количество теплоты, передаваемое газу в рабочей полости ЖВН на второй ступени.

Термодинамические свойства влажного воздуха, влияющие на интенсивность испарения, учитываются критерием Гухмана. Влияние конкретных факторов на протекание процессов тепло- и массообмена учитываются критериями Архимеда и Прандтля. Конвективный теплообмен между жидкой средой и поверхностью твердого тела характеризуется критерием Нуссельта.

После определения удельной мощности необходимо провести расчет расхода дополнительной жидкости.

Заключение

Одним из наиболее важных тепломассообменных процессов, в которых используется ЖВН, является сушка различных материалов. Экспериментально установлено, что для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки целесообразно использовать жидкостнокольцевой вакуум-насос с возможностью отключения второй ступени. Разработана методика расчета удельной мощности двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса модульного типа с возможностью отключения второй ступени для ДКВИС с учетом влияния тепловых процессов, происходящих как в насосе, так и сушильной установке. Перспективой дальнейших исследований является изучение особенностей применения жидкостнокольцевого вакуум-насоса с кинематическим замыканием.

Список литературы

1. Фролов, Е. С. Вакуумная техника : справ. / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 359 с.
2. Иванов, В. И. Вакуумная техника : учеб. пособие / В. И. Иванов. – СПб. : Университет ИТМО, 2016. – 129 с.
3. Rodionov, Yu. V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology / Yu. V. Rodionov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3-2. – С. 779 – 784.

4. Райзман, И. А. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры / И. А. Райзман – Казань : Казанский гос. техн. ун-т, 1995. – 258 с.
5. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps / Yu. V. Rodionov, Yu. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Т. 55, № 5-6. – С. 473 – 479. doi: 10.1007/s10556-019-00648-z
6. Effects of Drying and Grinding in Production of Fruit and Vegetable Powders: A Review / M. C. Karam, J. Petit, D. Zimmer [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2016. – Vol. 188. – P. 32 – 49.
7. Комбинированная вакуум-импульсная сушка растительного материала / А. И. Скоморохова, Ю. В. Родионов, О. А. Зорина, Э. С. Иванова // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 12–13 ноября 2020 г., Воронеж. – Воронеж, 2020. – С. 252 – 255.
8. Родионов, Ю. В. Обоснование выбора вакуумных насосов для конвективной вакуумной ступени сушки растительных материалов / Ю. В. Родионов, В. Г. Однолько, И. В. Попова // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2009. – № 6 (20). – С. 106 – 110.
9. Обеспечение длительного хранения плодово-овощной продукции вакуумным способом с предварительной обработкой озоном / С. В. Мищенко, В. Г. Однолько, Ю. В. Воробьев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 598 – 604.
10. Родионов, Ю. В. Влияние конструктивных технологических параметров на эффективность работы жидкостнокольцевых вакуум-насосов / Ю. В. Родионов, М. М. Свиридов, Д. В. Никитин // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 102 – 104.
11. Родионов, Ю. В. Совершенствование теоретических методов расчета и обоснование параметров и режимов жидкостнокольцевых вакуумных насосов с учетом особенностей технологических процессов в АПК : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Родионов Юрий Викторович. – Тамбов, 2013. – 434 с.
12. Никитин, Д. В. Совершенствование конструкций и обеспечение заданных эксплуатационных характеристик жидкостнокольцевых вакуум-насосов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Никитин Дмитрий Вячеславович. – Тамбов, 2010. – 158 с.
13. Особенности расчета двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса модульного типа с последовательным включением ступеней / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, В. А. Преображенский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 696 – 702.
14. Галич, В. П. Исследование рабочего процесса жидкостно-кольцевых машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Галич Виктор Петрович. – Казань, 1980. – 162 с.
15. Попова, И. В. Комбинированная конвективно-вакуум-импульсная сушка – качественная переработка сельскохозяйственной продукции / И. В. Попова, Ю. В. Родионов, А. А. Флаат // Качество науки – качество жизни : материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф., 26–27 февраля 2008 г., Тамбов. – Тамбов, 2008. – С. 156–157.
16. Повышение энергоэффективности двухступенчатой КВИС растительного сырья / А. В. Щегольков, А. С. Зорин, Ю. В. Родионов, А. Б. Гриднев // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства : сб. тр. Междунар. науч.-техн. семинара, посвященного 75-летию со дня рождения К. А. Тимирязева, 22–23 мая 2018 г., Москва. – М., 2018. – С. 181 – 185.
17. Исследование и выбор режимных параметров сушки чеснока сорта «Юбилейный Грибовский» / Э. С. Иванова, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2019. – № 4. – С. 67 – 73.

18. Инновационные технологии сушки растительного сырья / Ю. Г. Скрипников, М. А. Митрохин, Е. П. Ларионова [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики*. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 3 (41). – С. 371 – 376.
19. Зорин, А. С. Совершенствование технологии и технических средств комбинированной вакуумной сушки растительного сырья для производства чипсов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Зорин Александр Сергеевич. – Тамбов, 2019. – 156 с.
20. Иванова, Е. П. Разработка технологии приготовления сухой закваски на основе растительного сырья для производства хлебобулочных изделий функционального назначения : дис. ... канд. с.-хоз. наук : 05.18.01 / Иванова Екатерина Петровна. – Мичуринск, 2016. – 152 с.
21. Пат. 2343316 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина / Ю. В. Воробьев, В. А. Максимов, В. В. Попов, Ю. В. Родионов, М. М. Свиридов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – № 2007115026/06 ; заявл. 20.04.2007 ; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1. – 5 с.
22. Пат. 2551449 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина / А. А. Гуськов, Д. В. Никитин, П. С. Платинин, Ю. В. Родионов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – № 2014127083/06 ; заявл. 02.07.2014 ; опубл. 27.05.2015, Бюл. № 15. – 6 с.
23. Мамонтов, М. А. Основы термодинамики тела переменной массы / М. А. Мамонтов. – Тула : Приокское книжное издательство, 1970. – 89 с.
24. Пат. 2303166 Российская Федерация, МПК F04C 15/00. Жидкостно-кольцевая машина с автоматическим регулированием проходного сечения нагнетательного окна / А. В. Волков, Ю. В. Воробьев, Д. В. Никитин, В. В. Попов, Ю. В. Родионов, М. М. Свиридов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – № 2005116616/06 ; заявл. 31.05.2005 ; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 6 с.
25. Пат. 2492360 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Жидкостно-кольцевая машина / П. А. Галкин, А. С. Зорин, Д. В. Никитин, А. А. Нищев, Ю. В. Родионов, М. В. Сычев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ООО «Навакс». – № 2011144960/06 ; заявл. 07.11.2011 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 7 с.
26. Сакун, И. А. Винтовые компрессоры : основы теории, расчет, конструкция / И. А. Сакун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1970. – 400 с.
27. Influence of Heat and Mass Exchange in a Liquid Ring Vacuum Pump on its Working Characteristics / E. V. Osipov, E. Sh. Telyakov, R. M. Latypov, D. Bugembe // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – Vol. 92, No. 4. – P. 1055 – 1063.

Liquid Ring Vacuum Pumps for Heat and Mass Transfer Processes

D. V. Nikitin¹, Yu. V. Rodionov¹, M. A. S. Makhmud¹,
A. I. Skomorokhova², A. N. Pakhomov³, A. S. Zorin⁴

*Departments of Mechanics and Engineering Graphics (1), rodionow.u.w@rambler.ru;
Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (2);
Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (3), TSTU, Tambov;
LLC “3-line” (4), Rasskazovo, Tambov region, Russia*

Keywords: liquid ring vacuum pump; material balance; heat balance; heat exchange.

Abstract: The paper examines the calculation of a liquid ring vacuum pump, using the example of the drying process of various materials. It was found that for two-stage convective vacuum-impulse drying it is economically efficient to use a two-stage liquid ring vacuum pump with the ability to turn off the second stage. A method for calculating the specific power of one-stage and two-stage liquid ring vacuum pumps, taking into account heat and mass transfer and thermal processes that occur during operation is proposed.

References

1. Frolov Ye.S., Minaychev V.Ye., Aleksandrova A.T. [et al.] *Vakuumnaya tekhnika: spravochnik* [Vacuum technology: a reference book], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 359 p. (In Russ.)
2. Ivanov V.I. *Vakuumnaya tekhnika: uchebnoye posobiye* [Vacuum technology: a tutorial], St. Petersburg: Universitet ITMO, 2016, 129 p. (In Russ.)
3. Rodionov Yu.V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 3-2, pp. 779-784. (In Eng., abstract in Russ.)
4. Rayzman I.A. *Zhidkostnokol'tsevyye vakuumnyye nasosy i kompressory* [Liquid ring vacuum pumps and compressors], Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 1995, 258 p. (In Russ.)
5. Rodionov Yu.V., Selivanov Yu.T., Nikitin D.V., Sychev M.V., Kombarova P.V. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 5-6, pp. 473-479, doi: 10.1007/s10556-019-00648-z
6. Karam M.C., Petit J., Zimmer D., Baudelaire E.N., Scher J. Effects of Drying and Grinding in Production of Fruit and Vegetable Powders: A Review, *Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 188, pp. 32-49.
7. Skomorokhova A.I., Rodionov Yu.V., Zorina O.A., Ivanova E.S. *Innovatsionnyye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva dlya APK* [Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex], Proceedings of the International Scientific Practical Conference, 12–13 November, 2020, Voronezh, 2020, pp. 252-255. (In Russ.)
8. Rodionov Yu.V., Odnol'ko V.G., Popova I.V. [Justification of the choice of vacuum pumps for the convective vacuum stage of drying plant materials], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2009, no. 6 (20), pp. 106-110. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Mishchenko S.V., Odnol'ko V.G., Vorob'yev Yu.V. [et al.] [Provision of long-term storage of fruit and vegetable products by vacuum method with preliminary treatment with ozone], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 598-604. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Rodionov Yu.V., Sviridov M.M., Nikitin D.V. [Influence of design technological parameters on the efficiency of liquid ring vacuum pumps], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2007, vol. 50, no. 5, pp. 102-104. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Rodionov Yu.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2013, 434 p. (In Russ.)
12. Nikitin D.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2010, 158 p. (In Russ.)

13. Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Preobrazhenskiy V.A., Zorin A.S., Baranov A.A. [Features of the calculation of a two-stage liquid ring vacuum pump of modular type with sequential switching of stages], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 696-702. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Galich V.P. *PhD Dissertation (Technical)*, Kazan, 1980, 162 p. (In Russ.)
15. Popova I.V., Rodionov Yu.V., Flaata A.A. *Kachestvo nauki - kachestvo zhizni* [Quality of science - quality of life], Proceedings of the 4th International Scientific Practical Conference, 26-27 February, 2008, Tambov, 2008, pp. 156-157. (In Russ.)
16. Shchegol'kov A.V., Zorin A.S., Rodionov Yu.V., Gridnev A.B. *Sushka, khraneniye i pererabotka produktsii rasteniyevodstva* [Drying, storage and processing of crop production], Proceedings of Works of the International Scientific and Technical Seminar dedicated to the 75th birthday of K.A. Timiryazev, 22-23 May, 2018, Moscow, 2018, pp. 181-185. (In Russ.)
17. Ivanova E.S., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Danilin S.I., Ratushnyy A.S. [Research and selection of regime parameters for drying garlic varieties "Yubileiny Gribovsky"], *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK - produkty zdorovogo pitaniya* [Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products], 2019, no. 4, pp. 67-73. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Skripnikov Yu.G., Mitrokhin M.A., Larionova Ye.P., Rodionov Yu.V., Zorin A.C. [Innovative technologies for drying vegetable raw materials], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 3 (41), pp. 371-376. (In Russ., abstract in Eng.)
19. Zorin A.S. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2019, 156 p. (In Russ.)
20. Ivanova E.P. *PhD Dissertation (Agricultural)*, Michurinsk, 152 p. (In Russ.)
21. Vorob'yev Yu.V., Maksimov V.A., Popov V.V., Rodionov Yu.V., Sviridov M.M. *Dvukh-stupenchataya zhidkostno-kol'tsevaya mashina* [Two-stage liquid ring machine], Russian Federation, 2009, Pat. 2343316. (In Russ.)
22. Gus'kov A.A., Nikitin D.V., Platitsin P.S., Rodionov Yu.V. *Dvukh-stupenchataya zhidkostno-kol'tsevaya mashina* [Two-stage liquid ring machine], Russian Federation, 2015, Pat. 2551449. (In Russ.)
23. Mamontov M.A. *Osnovy termodinamiki tela peremennoy massy* [Fundamentals of thermodynamics of a variable mass body], Tula: Priokskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1970, 89 p. (In Russ.)
24. Volkov A.V., Vorob'yev Yu.V., Nikitin D.V., Popov V.V., Rodionov Yu.V., Sviridov M.M. *Zhidkostno-kol'tsevaya mashina s avtomaticheskim regulirovaniyem prokhodnogo secheniya nagnetatel'nogo okna* [Liquid ring machine with automatic regulation of the flow section of the injection window], Russian Federation, 2007, Pat. 2303166. (In Russ.)
25. Galkin P.A., Zorin A.S., Nikitin D.V., Nishchev A.A., Rodionov Yu.V., Sychev M.V. *Zhidkostno-kol'tsevaya mashina* [Liquid-bone-ring machine], 2013, Pat. 2492360. (In Russ.)
26. Sakun I.A. *Vintovyye kompressory: osnovy teorii, raschet, konstruktsiya* [Screw compressors: theory bases, calculation, design], Moscow: Mashinostroyeniye, 1970, 400 p. (In Russ.)
27. Osipov E.V., Telyakov E.Sh., Latypov R.M., Bugembe D. Influence of Heat and Mass Exchange in a Liquid Ring Vacuum Pump on its Working Characteristics, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 4, pp. 1055-1063.

Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen für Wärme- und Massenaustausch-Prozesse

Zusammenfassung: Es ist die Berechnung einer Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe am Beispiel des Trocknungsprozesses verschiedener Materialien betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass es für die zweistufige konvektive Vakuum-Impulstrocknung wirtschaftlich sinnvoll ist, eine zweistufige Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe mit der Möglichkeit, die zweite Stufe abzuschalten, zu verwenden. Es ist ein Verfahren zur Berechnung der spezifischen Leistung von ein- und zweistufigen Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen unter Berücksichtigung des Wärme- und Stoffübergangs sowie der im Betrieb auftretenden thermischen Prozesse vorgestellt.

Pompes à vide à anneau liquides pour le transfert de chaleur et de masse

Résumé: Est examiné le calcul de la pompe à vide à anneau liquide à l'exemple du processus de séchage des divers matériaux. Est établi que pour le séchage par convection sous vide à deux étages, il est économiquement efficace d'utiliser une pompe à vide à anneau liquide à deux étages avec la possibilité de désactiver le deuxième étage. Est présentée une méthode de calcul de la puissance spécifique des pompes à vide à anneau liquide à un étage et à deux étages en tenant compte du transfert de chaleur et des processus thermiques qui se produisent pendant le fonctionnement.

Авторы: *Никитин Дмитрий Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Махмуд Мохаммед Али Сами* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Скоморохова Анастасия Игоревна* – магистрант; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов; *Зорин Александр Сергеевич* – генеральный директор ООО «З-лайн», г. Рассказово, Тамбовская область, Россия.

Рецензент: *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ВЛИЯНИЕ ХАЛКОНОВ И ФЛАВАНОНОВ НА ЗИМАЗНУЮ АКТИВНОСТЬ ДРОЖЖЕЙ *Saccharomyces cerevisiae*

С. Е. Синютина, А. Г. Шубина, Л. В. Розенблюм

Кафедра биохимии и фармакологии, *sinjutina_s_e@mail.ru*;
ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»

Ключевые слова: биологическая активность; дрожжевая клетка; семейство *Saccharomycetaceae*; флаваноиды; халконы.

Аннотация: Исследована биологическая активность семи халконов и шести флаванонов в отношении дрожжей семейства *Saccharomycetaceae*. Показано, что 2',4'-дигидроксиалкон, 2',4'-дигидрокси-5'-этилалкон, 7-гидрокси-6-этилфлаванон, 7-гидрокси-6-*n*-гексилфлаванон, 7-метокси-6-*трет*-бутилфлаванон в концентрации 50...100 мкмоль/л подавляют метаболизм дрожжевой клетки и снижают зимазную активность *Saccharomyces cerevisiae*. Установлено, что исследованные флаваноиды не обладают биологической активностью по отношению к *Candida albicans*.

Введение

Флаваноиды – группа соединений, представляющих собой производные бензо-γ-пирона. К ним относятся халконы и изомерные им флаваноны (рис. 1). Они отличаются большим структурным многообразием, в частности, за счет наличия различных заместителей. Флаваноидные соединения обладают биологической активностью, в основе которой лежат их участие в окислительно-восстановительных процессах, взаимодействие с мембранами клеток, ферментами и рецепторами. Флаваноиды проявляют антиоксидантное действие, блокируя неконтролируемые свободнорадикальные процессы, оказывают противовоспалительное действие, обладают антидиабетической активностью, благотворно влияют на липидный обмен [1, 2]. Вместе с тем флаваноиды способны повреждать биологические структуры клеток и снижать их жизнеспособность [3, 4]. Для многих соединений флаваноидного ряда характерны антимикробная, противогрибковая, противопаразитарная, противоопухолевая активность [5 – 7].

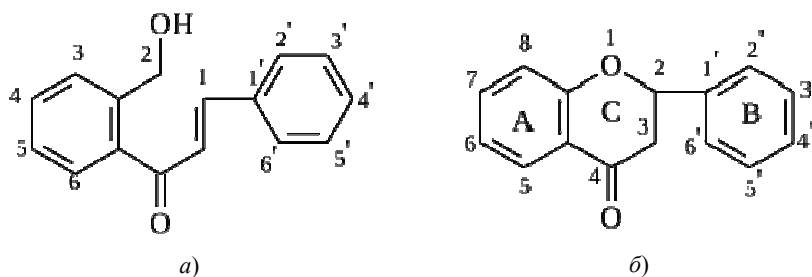


Рис. 1. Общая структура молекул халкона (а) и флаванона (б)

Биологическая активность флаваноидных соединений сильно варьирует в зависимости от вида соединения, природы и расположения заместителей. Закономерности влияния структуры флаваноидов на проявляемую активность исследованы недостаточно, поэтому изучение биологической активности флаваноидных соединений продолжает оставаться актуальным.

Методика эксперимента

Исследована биологическая активность семи халконов: 1 – 2',4'-дигидрокси-халкон; 2 – 2',4'-дигидрокси-5'-этилхалкон; 3 – 2',4'-дигидрокси-5'-*n*-гексилхалкон; 4 – 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкон; 5 – 2',4'-дигидрокси-5'-(2-метилбензил)халкон; 6 – 4'-гидрокси-2'-метоксихалкон; 7 – 2'-гидрокси-4'-метокси-5'-*трет*-бутилхалкон и шести флаванонов: 8 – 7-гидроксифлаванон; 9 – 7-гидрокси-6-этилфлаванон; 10 – 7-гидрокси-6-*n*-гексилфлаванон; 11 – 7-гидрокси-6-*трет*-бутилфлаванон; 12 – 7-гидрокси-6-(2-метилбензил)флаванон; 13 – 7-метокси-6-*трет*-бутилфлаванон. Халконы и флаваноны синтезированы по [8, 9].

В качестве биологического объекта исследований выбраны представители класса сахаромикетов (*Saccharomycetes*) семейства сахаромикетовых (*Saccharomycetaceae*) – *Saccharomyces cerevisiae* и *Candida albicans*. Зимазную активность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* определяли газометрическим методом при 35 °С по [10] при помощи газометра Елецкого. В качестве субстрата спиртового брожения использовали глюкозу. Готовили этанольные растворы флаваноидов в концентрации 2 и 4 ммоль/л. В реакционную смесь вводили 0,5 мл спиртового раствора соответствующего соединения. Концентрация флаваноидов в реакционной смеси составляла 50 и 100 мкмоль/л. Контрольная проба содержала 0,5 мл этанола. Влияние исследуемых соединений на жизнедеятельность *Candida albicans* определяли диско-диффузионным методом по [11]. Использовали пористые диски диаметром 5 мм (целлюлоза), содержащие 50 мкг исследуемого соединения.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Жизнеспособность дрожжевой клетки определяется скоростью метаболизма глюкозы и сахарозы (зимазная активность) и мальтозы (мальтазная активность) под действием комплекса ферментов спиртового брожения, которые участвуют в превращении моно- и дисахаридов в диоксид углерода и этанол. Зимазная активность соответствует времени (в минутах), за которое происходит выделение 10 мл диоксида углерода в условиях эксперимента.

Введение 0,5 мл этанола в реакционную смесь приводит к незначительному снижению зимазной активности дрожжей. Подобный эффект ожидаем, так как этанол нарушает проницаемость клеточной мембраны, процессы транспорта питательных веществ («этанольный стресс») [12]. Для учета влияния этанола пробы, содержащие 0,5 мл C_2H_5OH , использовали как контроль.

Введение халконов в концентрации $C_{\text{халкона}} = 100$ мкмоль/л приводит к снижению зимазной активности дрожжей и замедлению выделения CO_2 в процессе спиртового брожения (рис. 2, а).

В наибольшей степени подавляет процесс катаболизма глюкозы 2',4'-дигидрокси-5'-циклогексилхалкон. Практически такой же ингибиторный эффект проявляют 2',4'-дигидрокси-халкон и 2',4'-дигидрокси-5'-этилхалкон.

Влияние флаванонов в концентрации $C_{\text{флаванона}} = 100$ мкмоль/л на процесс спиртового брожения в дрожжевой клетке неоднозначно (рис. 2, б). Флавоны 7-гидрокси-6-этилфлаванон, 7-гидрокси-6-*n*-гексилфлаванон и 7-метокси-6-*трет*-бутилфлаванон замедляют расщепление глюкозы, в то время как 7-гидрокси-6-*трет*-бутилфлаванон и 7-гидроксифлаванон выступают в качестве активаторов процесса.

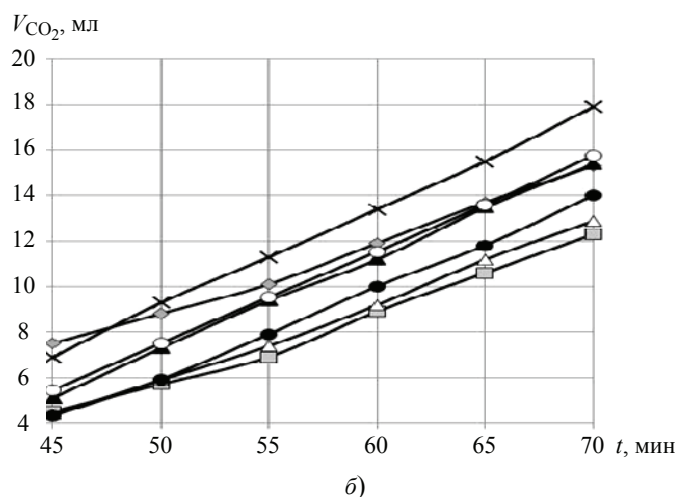
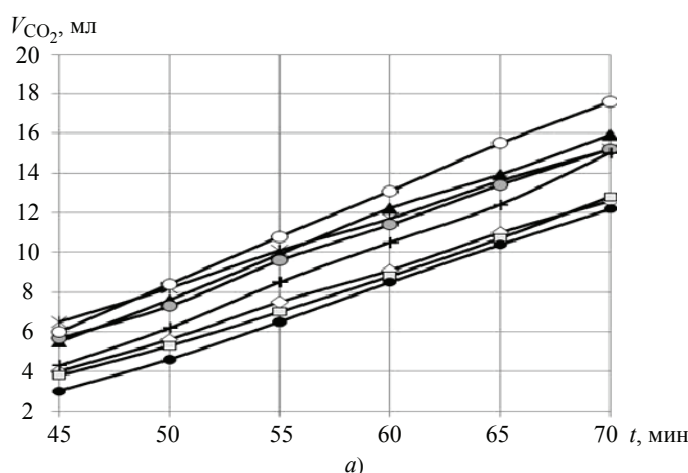


Рис. 2. Влияние халконов (а) и флаванонов (б) на объем выделившегося диоксида углерода:

а – $\diamond$ – 1; $\square$ – 2; $\blacktriangle$ – 3; $\bullet$ – 4; $\times$ – 5; $\circ$ – 6; $+$ – 7; $\circ$ – К

б – $\diamond$ – 8; $\square$ – 9; $\triangle$ – 10; $\bullet$ – 11; $\blacktriangle$ – 12; $\bullet$ – 13; $\circ$ – К;

Номер соединения соответствует вышепредставленной нумерации; К – контроль

Флаваноны образуются в результате циклизации халконов и являются их изомерами. Проведено сравнение влияния халконов и соответствующих им флаванонов на зимазную активность *Saccharomyces cerevisiae* (рис. 3). В паре 2',4'-диоксихалкон и 7-гидроксифлаванон в большей степени замедляет метаболизм дрожжевой клетки халкон. Для остальных пар соединений, содержащих алкильные радикалы в положении 5' (халконы) и в положении 7 (флаваноны), более выраженный эффект демонстрируют флаваноны.

Уменьшение концентрации флаваноида в реакционной смеси до 50 мкмоль/л приводит к снижению ингибиторного эффекта соединения 1 и 3; практически не влияет на биологический эффект соединений 5, 2 и 4 (табл. 1).

Снижение зимазной активности дрожжей в присутствии ряда флаваноидов может быть связано как с ингибированием ферментов зимазного комплекса, так и влиянием на клеточную мембрану и мембранный потенциал, а также с ингибированием матричных синтезов [6, 13]. Установление механизмов действия флаваноидов требует проведения дополнительных исследований.

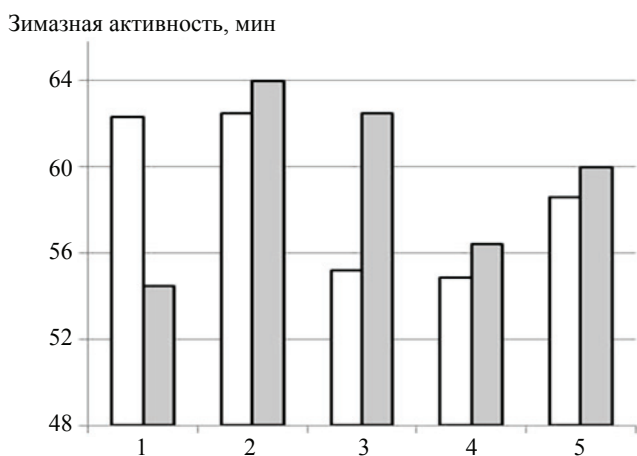


Рис. 3. Влияние халконов и соответствующих им флаванонов на зимазную активность *Saccharomyces cerevisiae*:
 1 – 1 и 8; 2 – 2 и 9; 3 – 3 и 10; 4 – 4 и 12; 5 – 7 и 13;
 □ – халкон; ■ – флаванон

Таблица 1

Влияние халконов и флаванонов на зимазную активность *Saccharomyces cerevisiae*

Номер по порядку	Соединение	Зимазная активность, мин, при концентрации, мкмоль/л	
		50	100
1	2',4'-дигидроксихалкон	58'19''	62'20''
2	2',4'-дигидрокси-5'-этилхалкон	60'24''	62'31''
3	7-гидрокси-6-этилфлаванон	55'44	63'59''
4	7-гидрокси-6-н-гексилфлаванон	60'32''	62'27''
5	7-метокси-6- <i>трет</i> -бутил-флаванон	60'38''	60'

Candida albicans, так же как и *Saccharomyces cerevisiae*, относится к семейству *Saccharomycetaceae*. *Candida albicans* метаболизирует глюкозу по пути гликолиза либо по гексозо-монофосфатному пути. Данный вид является возбудителем оппортунистических инфекций человека. При использовании диско-диффузионного метода при заданном содержании флаваноидов (50 мкг) не обнаружено подавления зон роста, то есть исследованные халконы и флаваноны не проявляют фунгицидной активности по отношению к *Candida albicans* в данной концентрации.

Выводы

Алкилгидроксихалконы и изомерные им флаваноны проявляют биологическую активность по отношению к *Saccharomyces cerevisiae*, снижая зимазную активность. Действие флаваноидов на живые объекты характеризуется высокой избирательностью. Исследование биологической активности не только природных, но и синтезированных флаваноидов является перспективным направлением.

Список литературы

1. Lifestyle, Oxidative Stress, and Antioxidants: Back and Forth in the Pathophysiology of Chronic Diseases / M. Sharifi-Rad, N. V. Anil Kumar, P. Zucca [et al.] // *Front Physiol.* – 2020. – Vol. 11. – Art. 694. – 21 p. doi: 10.3389/fphys.2020.00694.
2. Pharmacological Properties of Chalcones: A Review of Preclinical Including Molecular Mechanisms and Clinical Evidence / B. Salehi, C. Quispe, I. Chamkhi [et al.] // *Front Pharmacol.* – 2021. – Vol. 11. – Art. 592654. – 21 p. doi: 10.3389/fphar.2020.592654.
3. Electrochemical Behavior and Antioxidant and Prooxidant Activity of Natural Phenolics / A. Simić, D. Manojlović, D. Segan, M. Todorović // *Molecules.* – 2007. – Vol. 12 (10). – P. 2327 – 2340. doi: 10.3390/12102327.
4. Walle, T. Evidence of Covalent Binding of the Dietary Flavonoid Quercetin to DNA and Protein in Human Intestinal and Hepatic Cells / T. Walle, T. S. Vincent, U. K. Walle // *Biochemical Pharmacology.* – 2003. – Vol. 65, Issue 10. – P. 1603 – 1610. doi: 10.1016/s0006-2952(03)00151-5.
5. Stompor, M. Antimicrobial Activity of Xanthohumol and Its Selected Structural Analogues / M. Stompor, B. Żarowska // *Molecules.* – 2016. – Vol. 21 (5). – Art. 608. – 10 p. doi: 10.3390/molecules21050608.
6. Antifungal Activity of Phenolic-Rich *Lavandula Multifida* L. Essential Oil / M. Zuzarte, L. Vale-Silva, M. Gonçalves [et al.] // *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases.* – 2012. – Vol. 31. – P. 1359 – 1366. doi: 10.1007/s10096-011-1450-4.
7. Synthesis of Chalcones with Anticancer Activities / S. Syam, S. I. Abdelwahab, M. A. Al-Mamary, S. Mohan // *Molecules.* – 2012. – Vol. 17. – P. 6179 – 6195. doi: 10.3390/molecules17066179.
8. Старков, С. П. Синтез 5'-алкил-2',4'-диоксихалконов / С. П. Старков, А. И. Панасенко // *Журнал органической химии.* – 1971. – Т. 7, № 7. – С. 1463 – 1466.
9. Панасенко, А. И. Кинетика и механизм образования 7-оксифлаванона из 2',4'-диоксихалкона в щелочной среде / А. И. Панасенко, О. И. Качурин, С. П. Старков // *Изв. высш. учеб. заведений. Химия и хим. технология.* – 1975. – Т. 18, № 8. – С. 1203 – 1207.
10. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей / Под ред. С. С. Новиковской, Ю. И. Шишацкого. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 375 с.
11. МУК 4.2.1890-04 Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. – Текст электронный // Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – URL : https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=4957 (дата обращения: 01.06.2021).
12. Влияние окислительного, теплового и этанольного стрессов на выживаемость дрожжей *Yarrowia Lipolytica* / Г. П. Ежова, А. Ю. Аринбасарова, В. Ф. Смирнов, Е. В. Гусева // *Вестн. Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского.* – 2010. – № 6. – С. 113 – 118.
13. Antimicrobial Action Mechanism of flavonoids from *Dorstenia* Species / Dzoyem J. P., Hamamoto H., Ngameni B. [et al.] // *Drug Discoveries & Therapeutics.* – 2013. – Vol. 7 (2). – P. 66 – 72. doi: 10.5582/ddt.2013.v7.2.66.

The Effect of Chalcones and Flavanones on Zymase Fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*

S. E. Sinyutina, A. G. Shubina, L. V. Rosenblum

Department of Biochemistry and Pharmacology, sinjutina_s_e@mail.ru;
Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Keywords: biological activity; yeast cell; family *Saccharomycetaceae*; flavanoids; chalcones.

Abstract: The biological activity of seven chalcones and six flavanones in yeasts of the *Saccharomycetaceae* family has been investigated. It has been shown that 2',4'-dihydroxychalcone, 2',4'-dihydroxy-5'-ethylchalcone, 7-hydroxy-6-ethylflavanone, 7-hydroxy-6-*n*-hexylflavanone, 7-methoxy-6-*tert*-butylflavanone at a concentration of 50...100 µmol/l suppresses the metabolism of the yeast cell and reduces the zymase fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*. It was found that the investigated flavanones have no biological activity in relation to *Candida albicans*.

References

1. Sharifi-Rad M., Anil Kumar N.V., Zucca P. [et al.] Lifestyle, Oxidative Stress, and Antioxidants: Back and Forth in the Pathophysiology of Chronic Diseases, *Front Physiol*, 2020, vol. 11, art. 694, 21 p., doi: 10.3389/fphys.2020.00694.
2. Salehi B., Quispe C., Chamkhi I. [et al.] Pharmacological Properties of Chalcones: A Review of Preclinical Including Molecular Mechanisms and Clinical Evidence, *Front Pharmacol*, 2021, vol. 11, art. 592654, 21 p., doi: 10.3389/fphar.2020.592654.
3. Simić A., Manojlović D., Segan D., Todorović M. Electrochemical Behavior and Antioxidant and Prooxidant Activity of Natural Phenolics, *Molecules*, 2007, vol. 12 (10), pp. 2327-2340, doi: 10.3390/12102327.
4. Walle T., Vincent T.S., Walle U.K. Evidence of Covalent Binding of the Dietary Flavonoid Quercetin to DNA and Protein in Human Intestinal and Hepatic Cells, *Biochemical Pharmacology*, 2003, vol. 65, issue 10, pp. 1603-1610, doi: 10.1016/s0006-2952(03)00151-5.
5. Stompor M., Żarowska B. Antimicrobial Activity of Xanthohumol and its Selected Structural Analogues, *Molecules*, 2016, vol. 21 (5), art. 608, 10 p., doi: 10.3390/molecules21050608.
6. Zuzarte M., Vale-Silva L., Gonçalves M. [et al.] Antifungal Activity of Phenolic-Rich *Lavandula Multifida* L. Essential Oil, *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 2012, vol. 31, pp. 1359-1366, doi: 10.1007/s10096-011-1450-4.
7. Syam S., Abdelwahab S.I., Al-Mamary M.A., Mohan S. Synthesis of Chalcones with Anticancer Activities, *Molecules*, 2012, vol. 17, pp. 6179-6195, doi: 10.3390/molecules17066179.
8. Starkov S.P., Panasenko A.I. [Synthesis of 5'-alkyl-2',4'-dioxychalcones], *Zhurnal organicheskoy khimii* [Journal of organic chemistry], 1971, vol. 7, no. 7, pp. 1463-1466. (In Russ.)
9. Panasenko A.I., Kachurin O.I., Starkov S.P. [Kinetics and mechanism of formation of 7-hydroxyflavanone from 2',4'-dioxychalcone in an alkaline medium], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology], 1975, vol. 18, no. 8, pp. 1203-1207. (In Russ.)

10. Novakovskaya S.S., Shishatskiy Yu.I. [Eds.] *Spravochnik po proizvodstvu khlebopekarnykh drozhzhey* [Handbook on the production of baker's yeast], Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1980, 375 p. (In Russ.)

11. https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=4957 (accessed 01 June 2021).

12. Yezhova G.P., Arinbasarova A.Yu., Smirnov V.F., Guseva Ye.V. [The influence of oxidative, heat and ethanol stresses on the survival of the yeast *Yarrowia Lipolytica*], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky], 2010, no. 6, pp. 113-118. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Dzoyem J.P., Hamamoto H., Ngameni B., Ngadjui B.T., Sekimizu K. Antimicrobial Action Mechanism of flavonoids from *Dorstenia* Species, *Drug Discoveries & Therapeutics*, 2013, Vol. 7 (2), pp. 66-72, doi: 10.5582/ddt.2013.v7.2.66.

Wirkung von Chalconen und Flavanonen auf Zymase-Aktivität der Hefe *Saccharomyces cerevisiae*

Zusammenfassung: Es ist die biologische Aktivität von sieben Chalconen und sechs Flavanonen gegen Hefen der Familie der *Saccharomycetaceae* untersucht. Es ist gezeigt, dass 2',4'-Dihydroxychalcon, 2',4'-Dihydroxy-5'-Ethylchalcon, 7-Hydroxy-6-Ethylflavanon, 7-Hydroxy-6-*n*-Hexylflavanon, 7-Methoxy-6-*tert*-Butylflavanon bei einer Konzentration von 50...100 µmol/l den Stoffwechsel der Hefezelle unterdrücken und die Zymaseaktivität von *Saccharomyces cerevisiae* reduzieren. Es ist festgestellt, dass die untersuchten Flavanone gegenüber *Candida albicans* keine biologische Aktivität aufweisen.

Effet des chalcones et des flavanones sur l'activité zymase de la levure *Saccharomyces cerevisiae*

Résumé: Est étudiée l'activité biologique de sept chalcones et de sept flavanones contre des levures de la famille des *Saccharomycetaceae* *Spectacle*. Est montré que 2',4'-dihydroxychalcone, 2',4'-dihydroxy-5'-ethylchalcone, 7-hydroxy-6-ethylflavanone, 7-hydroxy-6-*n*-hexylflavanone, 7-méthoxy-6-*tert*-butylflavanone à une concentration de 50...100 µmol/l inhibent le métabolisme des cellules de levure et réduisent l'activité hivernale de *Saccharomyces cerevisiae*. Est établi que les flavanoïdes étudiés n'ont pas d'activité biologique par rapport à *Candida albicans*.

Авторы: Синюткина Светлана Евгеньевна – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой биохимии и фармакологии; Шубина Анна Геннадиевна – кандидат химических наук, доцент кафедры биохимии и фармакологии; Розенблюм Людмила Васильевна – старший преподаватель кафедры биохимии и фармакологии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: Дворецкий Дмитрий Станиславович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОГРАНИЧЕННОСТЬ СЕМЕЙСТВ ОПЕРАТОРОВ СВЕРТКИ В ПРОСТРАНСТВАХ L^p

А. Д. Нахман

*Кафедра «Высшая математика», alexymb@mail.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: квазивыпуклые коэффициенты; максимальные оценки; операторы свертки.

Аннотация: Изучается однопараметрическое семейство сверточных операторов, действующих в лебеговых пространствах L^p . Рассмотрен случай интегральных ядер, заданных коэффициентами Фурье. Установлено, что условие квазивыпуклости коэффициентов обеспечивает ограниченность соответствующих максимальных операторов. Изучено предельное поведение семейств в метриках пространств непрерывных функций, классов L^p , $p \geq 1$, а также получена сходимость почти всюду. Указаны пути возможных обобщений и распространений.

1. Введение

Пусть $Q = (-\pi, \pi]$ и $L^p(Q)$, $p > 0$ – пространство Лебега 2π -периодических функций с нормой

$$\|f\|_p = \left(\int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^p dx \right)^{1/p} < \infty.$$

Обозначим $L(Q) = L^1(Q)$ и $\|f\| = \|f\|_1$.

Рассмотрим также семейство 2π -периодических четных функций $K_h(x)$, $h > 0$, каждая из которых формально определяется в виде

$$K_h(x) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{|k|}(h) \exp(ikx). \quad (1.1)$$

Условия на последовательность коэффициентов $\{\lambda_k(h)\}$, которые будут предложены ниже, обеспечат, в частности, сходимость ряда (1.1) почти всюду и принадлежность его суммы пространству $L(Q)$.

Для произвольной функции $f(x) \in L(Q)$ построим семейство операторов свертки

$$(f * K_h)(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) K_h(x-t) dt. \quad (1.2)$$

К изучению операторов свертки сводится, например, задача суммирования рядов Фурье функций $f(x) \in L(Q)$ линейными методами. Последней задаче посвящены работы [1 – 6] и другие, в которых рассматривались в первую очередь суммирующие финитные последовательности

$$\Lambda = \{\lambda_k^n; k = 0, 1, \dots, n; n = 0, 1, \dots; \lambda_0^n = 1, \lambda_k^n = 0, k > n\},$$

определяемые в (1.2) дискретными значениями параметра h . Отдельные примеры полунепрерывных методов $\{\lambda_k(h)\}$ имеются в [7, 8]. В частности, в [7] исследованы некоторые экспоненциальные методы суммирования. Соответствующая задача была в общем виде поставлена Б. П. Осилекером в связи с широким кругом применения таких методов в анализе Фурье; см., напр., [9, с. 561 – 565]. Различные подходы к ее решению представлены в [10, 11], а также более поздних работах тех же авторов.

Настоящая работа продолжает исследование [8] в терминах условий на коэффициенты $\lambda_k(h)$, $k = 0, 1, \dots$, в (1.2). Рассматриваются вопросы ограниченности в пространствах Лебега и предельное поведение при $h \rightarrow +0$ семейств (1.2).

2. Вспомогательные утверждения

Положим $\Delta\lambda_k(h) = \lambda_k(h) - \lambda_{k+1}(h)$, $\Delta\lambda_k^2(h) = \Delta(\Delta\lambda_k(h))$, $k = 0, 1, \dots$; здесь и в дальнейшем через C обозначаем постоянные, различные, вообще говоря, в различных формулах и зависящие лишь от явно указанных индексов. Пусть

$$\sum(\lambda, h) = \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) |\Delta^2\lambda_k(h)|. \quad (2.1)$$

Последовательность $\{\lambda_k(h)\}$ называется квазивыпуклой, если существует постоянная $C = C_\lambda$, такая что

$$\sup_{h>0} \sum(\lambda, h) \leq C_\lambda. \quad (2.2)$$

В соответствии с (1.1) в дальнейшем требуем, чтобы при каждом $h > 0$

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \lambda_N(h) = 0, \quad (2.3)$$

и для определенности считаем

$$\lambda_0(h) = 1. \quad (2.4)$$

Нам потребуются две числовые леммы, доказываемые стандартным образом.

Лемма 2.1. При выполнении (2.3) справедливо неравенство

$$\sum_{k=0}^{\infty} |\Delta\lambda_k(h)| \leq \sum(\lambda, h). \quad (2.5)$$

Действительно, в силу (2.3)

$$\sum_{v=k}^N \Delta^2\lambda_v(h) = \Delta\lambda_k(h) - \Delta\lambda_{N+1}(h) \rightarrow \Delta\lambda_k(h) \text{ при } N \rightarrow \infty,$$

тогда

$$\sum_{k=0}^{\infty} |\Delta\lambda_k(h)| = \sum_{k=0}^{\infty} \left| \sum_{v=k}^{\infty} \Delta^2\lambda_v(h) \right| \leq \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{k=0}^v |\Delta^2\lambda_v(h)| = \sum_{v=0}^{\infty} (v+1) |\Delta^2\lambda_v(h)|,$$

чем и доказано (2.5), если принять во внимание определение (2.1).

В частности, квазивыпуклая последовательность, удовлетворяющая условию (2.3), имеет ограниченное изменение. Тогда ряд (1.1) сходится при каждом $t \neq 0$ и $h > 0$, а его сумма $K_h(x)$ измерима на $[-\pi, \pi]$ как предел последовательности измеримых функций.

Лемма 2.2. Если выполнены условия (2.2), (2.3), то при каждом $h > 0$

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} N |\Delta \lambda_N(h)| = 0. \quad (2.6)$$

Результат (2.6) вытекает из (2.3) и соотношения

$$N |\Delta \lambda_N(h)| = N \left| \sum_{k=N}^{\infty} \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \leq \sum_{k=N}^{\infty} k |\Delta^2 \lambda_k(h)|,$$

правая часть которого в силу (2.2) стремится к нулю при $N \rightarrow \infty$.

3. Оценки последовательностей сверток с ядром Фейера

В вопросах суммируемости рядов Фурье методом средних арифметических [12, т. 1, с. 148 – 151], возникают свертки функций $f(x) \in L(Q)$ с ядрами Дирихле

$$D_k(t) = \frac{1}{2} + \sum_{v=1}^k \cos vt = \frac{\sin \left(k + \frac{1}{2} \right) t}{2 \sin \frac{1}{2} t}, \quad k = 1, 2, \dots; \quad D_0(t) = \frac{1}{2},$$

и Фейера

$$F_k(t) = \frac{1}{k+1} \sum_{v=0}^k D_k(t) = \frac{\sin^2 \frac{k+1}{2} t}{2(k+1) \sin^2 \frac{1}{2} t}, \quad k = 0, 1, \dots$$

Введем в рассмотрение функцию Стеклова

$$f_\eta = f_\eta(x) = \frac{1}{\eta} \int_{x-\eta}^{x+\eta} |f(t)| dt, \quad \eta > 0, \quad x \in Q,$$

и максимальную функцию Харди–Литтлвуда

$$f^* = f^*(x) = \sup_{\eta > 0} f_\eta(x), \quad x \in Q;$$

$f^*(x)$ существует почти всюду для всякой $f(x) \in L(Q)$, см. [12, т. 1, с. 55 – 61].

Для каждого $k = 0, 1, \dots$ выберем натуральное $S = S(k)$ такое, что

$$\frac{2^{S-1}}{k+1} \leq \pi < \frac{2^S}{k+1}.$$

Лемма 3.1. Имеют место оценки

$$\int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| F_k(t) dt \leq C \sum_{j=0}^S \frac{1}{2^j} f_{\frac{2^j}{k+1}}(x), \quad k = 0, 1, \dots, \quad (3.1)$$

и

$$\sup_{k=0,1,\dots,-\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| F_k(t) dt \leq C f^*(x). \quad (3.2)$$

Оценка (3.1) справедлива для всех $x \in Q$, а (3.2) для почти всех $x \in Q$ (именно в точках, где существует $f^*(x)$).

Доказательство. Очевидно, что

$$F_k(t) \leq C(k+1), \quad k = 0, 1, \dots, \quad (3.3)$$

и

$$F_k(t) \leq C \frac{1}{(k+1)t^2}, \quad 0 < |t| \leq \pi, \quad k = 0, 1, \dots. \quad (3.4)$$

В силу (3.3) и (3.4), получаем оценку

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| F_k(t) dt &\leq C \left[(k+1) \int_{|t| \leq \frac{1}{k+1}} |f(x+t)| dt + \sum_{j=1}^S \frac{k+1}{(2^{j-1})^2} \int_{\frac{2^{j-1}}{k+1} \leq |t| \leq \frac{2^j}{k+1}} |f(x+t)| dt \right] \leq \\ &\leq C \left[f_{\frac{2^0}{k+1}}(x) + \sum_{j=1}^S \frac{1}{2^j} \frac{k+1}{2^j} \int_{|t| \leq \frac{2^j}{k+1}} |f(x+t)| dt \right], \end{aligned}$$

откуда и вытекает (3.1). В свою очередь, (3.2) есть следствие (3.1) и сходимости ряда

$$\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{2^j}.$$

Лемма 3.1 доказана.

4. Преобразование интегрального ядра

Лемма 4.1. Пусть $\delta > 0$ – произвольно малое фиксированное число и выполнены условия (2.2) – (2.4). Тогда при всех $t \in [-\pi, \pi] \setminus (-\delta, \delta)$ имеет место соотношение

$$K_h(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \Delta^2 \lambda_k(h) F_k(t), \quad (4.1)$$

причем ряд (4.1) сходится абсолютно и равномерно.

Доказательство. Запишем

$$K_h(t) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^N \lambda_k(h) (D_k(t) - D_{k-1}(t)) \right)$$

и применим к сумме по k преобразование Абеля

$$K_h(t) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \left(\lambda_N(h) D_N(t) + \sum_{k=0}^{N-1} \Delta \lambda_k(h) D_k(t) \right). \quad (4.2)$$

Для ядра Дирихле при $\delta \leq |t| \leq \pi$ очевидна оценка

$$|D_k(t)| \leq \frac{C}{|t|} \leq \frac{C}{\delta},$$

согласно которой равенство (4.2) принимает вид

$$K_h(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \Delta \lambda_k(h) D_k(t), \quad (4.3)$$

если учесть (2.3). При этом ряд (4.3), в силу (2.2) и (2.5), абсолютно и равномерно сходится при $\delta \leq |t| \leq \pi$.

Далее, легко проверить, что

$$D_k(t) = (k+1)F_k(t) - kF_{k-1}(t),$$

а значит, применяя преобразования Абеля, будем иметь

$$\begin{aligned} K_h(t) &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \Delta \lambda_k(h) D_k(t) = \\ &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \left((N+1) \Delta \lambda_N(h) F_N(t) + \sum_{k=0}^{N-1} (k+1) \Delta^2 \lambda_k(h) F_k(t) \right). \end{aligned}$$

Теперь, в силу оценки (3.4) и соотношения (2.6), получаем

$$K_h(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \Delta^2 \lambda_k(h) F_k(t),$$

причем, согласно (2.2), ряд абсолютно и равномерно сходится при $\delta \leq |t| \leq \pi$.

Лемма 4.1 доказана.

5. Оценки операторов свертки в общем случае

Теорема 5.1. Пусть выполнены условия (2.2) – (2.4). Тогда имеют место оценки

$$|(f * K_h)(x)| \leq C \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \left(\sum_{j=0}^S \frac{1}{2^j} f_{\frac{2^j}{k+1}}(x) \right) \quad (5.1)$$

и

$$\sup_{h>0} |(f * K_h)(x)| \leq C_{\lambda} f^*(x). \quad (5.2)$$

Оценка (5.1) справедлива для всех $x \in Q$, а (5.2) для почти всех $x \in Q$ (именно, в точках, где существует $f^*(x)$).

Доказательство. Установим верхние оценки для мажорантного интеграла

$$J(f; x; h) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| \cdot |K_h(t)| dt. \quad (5.3)$$

Начнем рассмотрение со случая

$$J_{\delta}(f; x; h) = \frac{1}{\pi} \int_{\delta < |t| \leq \pi} |f(x+t)| \cdot |K_h(t)| dt,$$

где произвольно малое $\delta > 0$ фиксировано. Согласно (4.1)

$$J_{\delta}(f; x; h) \leq \frac{1}{\pi} \int_{\delta < |t| \leq \pi} |f(x+t)| \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| F_k(t) dt,$$

причем ряд, записанный под знаком интеграла, мажорируем числовым рядом (2.1), а значит, сходится равномерно. Тогда знак бесконечной суммы может быть вынесен за знак интеграла, после чего

$$J_{\delta}(f; x; h) \leq \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| F_k(t) dt.$$

Устремив δ к нулю в левой части последнего соотношения, получаем теперь оценку для (5.3)

$$J(f; x; h) \leq \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| F_k(t) dt. \quad (5.4)$$

Тогда, согласно (3.1),

$$\int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| |K_h(t)| dt \leq C \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \left(\sum_{j=0}^S \frac{1}{2^j} f_{\frac{2^j}{k+1}}(x) \right). \quad (5.5)$$

Далее, принимая во внимание (3.2), будем иметь

$$\int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| |K_h(t)| dt \leq C f * (x) \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right|. \quad (5.6)$$

Из оценок (5.5) и (5.6) вытекают теперь утверждения (5.1) и (5.2). Теорема 5.1 доказана.

6. L^1 -оценка операторов свертки

В настоящем параграфе ограничиваемся случаем L^1 -пространств, поскольку для L^p , $p > 1$ справедливы (как это будет следовать из результатов параграфа 7) более сильные оценки. В этом случае имеет место неравенство (см. [13])

$$\sup_{\eta > 0} \int_Q f_{\eta}(x) dx \leq C_p \int_Q |f(x)| dx. \quad (6.1)$$

Теорема 6.1. Пусть выполнены условия теоремы 5.1. Тогда справедлива оценка

$$\sup_{h > 0} \|f * K_h\| \leq C_{\lambda} \int_Q |f(x)| dx. \quad (6.2)$$

Доказательство. Согласно (5.1) имеем

$$\|f * K_h\| \leq C \int_Q \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \left(\sum_{j=0}^S \frac{1}{2^j} f_{\frac{2^j}{k+1}}(x) \right) dx.$$

Частичные суммы $S_N(x; h)$ ряда в правой части (5.1) возрастают и их интегралы ограничены в совокупности, поскольку

$$\begin{aligned} \int_Q S_N(x; h) dx &\leq \sum_{k=0}^N (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \left(\sum_{j=0}^S \frac{1}{2^j} \int_Q f_{\frac{2^j}{k+1}}(x) dx \right) \leq \\ &\leq C \left(\sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \right) \left(\sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{2^j} \right) \int_Q |f(x)| dx \leq C_{\lambda} \int_Q |f(x)| dx \end{aligned}$$

согласно (2.2) и (6.1). Следовательно, можно применить теорему Б. Леви о предельном переходе под знаком интеграла, в результате чего

$$\|f * K_h\| \leq C \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left| \Delta^2 \lambda_k(h) \right| \left(\sum_{j=0}^S \frac{1}{2^j} \int_Q f_{2^j}(x) dx \right) \leq C_\lambda \int_Q |f(x)| dx. \quad (6.3)$$

Утверждение (6.2) вытекает из (6.3).

7. Максимальные оценки сильного и слабого типа

Положим

$$U_*(f; \lambda) = U_*(f; \lambda; x) = \sup_{h>0} |(f * K_h)(x)|.$$

Теорема 7.1. Пусть выполнены условия теоремы 5.1. Тогда имеют место оценки:

$$\|U_*(f; \lambda)\|_p \leq C_{p,\lambda} \|f\|_p, \quad p > 1; \quad (7.1)$$

$$\|U_*(f; \lambda)\| \leq C_\lambda (1 + \|f(\ln^+ |f|)\|); \quad (7.2)$$

$$\|U_*(f; \lambda)\|_p \leq C_{p,\lambda} \|f\|, \quad 0 < p < 1. \quad (7.3)$$

Кроме того, справедлива следующая оценка слабого типа:

$$|x \in Q| U_*(f; \lambda; x) > \varsigma > 0| \leq C_\lambda \frac{\|f\|}{\varsigma}, \quad p \geq 1. \quad (7.4)$$

Доказательство. Как известно ([12, т. 1, с. 54 – 61]), неравенства (7.1) – (7.4) имеют место, если в левой части каждого из них заменить $U_*(f; \lambda)$ на максимальную функцию $f^*(x)$. Остается применить оценку (5.6).

Замечание 7.1. Как следует из результатов работы [14] и свойств максимальной функции $f^*(x)$, оценка (7.1) неверна, вообще говоря, при $p = 1$. В этом случае ее заменяют соотношения (7.2), (7.4), а также (6.2).

Замечание 7.2. При выполнении условий теоремы 5.1 из (7.1) и (6.2) следует, что

$$\sup_{h>0} \|f * K_h\|_p \leq C_{p,\lambda} \|f\|_p, \quad p \geq 1. \quad (7.5)$$

8. Сходимость по метрике и почти всюду

Обозначим через $C(Q)$ пространство непрерывных на Q 2π -периодических функций.

Теорема 8.1. Пусть выполнены условия (2.2) – (2.4) и

$$\lim_{h \rightarrow +0} \lambda_k(h) = 1, \quad k = 0, 1, \dots \quad (8.1)$$

Тогда соотношение

$$\lim_{h \rightarrow +0} (f * K_h)(x) = f(x) \quad (8.2)$$

выполнено

а) в метрике пространства $C(Q)$;

б) в метрике каждого из пространств $L^p(Q)$, $p \geq 1$;

в) почти всюду в Q для любой $L^p(Q)$, $p \geq 1$.

Доказательство. Как вытекает из теоремы Банаха–Штейнгауза, сходимость (8.2) по метрике данного полного пространства имеет место, если она справедлива для каждой функции из некоторой полной системы, и при этом семейство норм операторов $(f * K_h)(x)$ равномерно ограничено. Легко проверить (см. также, напр., [1]), что первое условие для полной в $C(Q)$ и $L^p(Q)$, $p \geq 1$ системы функций

$$\{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \dots\}$$

равносильно требованию (8.1).

Второе условие в случае пространства $C(Q)$ равносильно равномерной ограниченности констант Лебега

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |K_h(x-t)| dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |K_h(t)| dt,$$

которая в свою очередь вытекает из (5.5) и (2.2) при $f \equiv 1$; отметим здесь же, что теперь можно утверждать принадлежность суммы ряда (1.1) пространству $L(Q)$.

В случае пространств $L^p(Q)$, $p \geq 1$, ограниченность норм есть следствие (7.5).

Сходимость почти всюду (8.2) стандартным образом вытекает из оценки слабого типа (7.4) и все того же условия (8.1); см. [12, т. 2, с. 464–465].

Замечание 8.1. Можно уточнить характер точек, в которых сходимость (8.2) имеет место для любой $f \in L^p(Q)$, $p \geq 1$ – это точки Лебега (см. напр., [12, т. 1, с. 111]).

9. Примеры

Как показано в статье [10], условию (2.2) удовлетворяет всякая кусочно-выпуклая последовательность $\{\lambda_k(h)\}$. Там же приведены примеры некоторых квазивыпуклых последовательностей:

$$\lambda_0(h) = 1, \quad \lambda_k(h) = \lambda(x, h)|_{x=k}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad \text{где } \lambda(x, h) = \exp(-h\varphi(x)).$$

А именно, рассмотрены случаи:

$$1) \quad \varphi(x) = \ln^\alpha x, \quad x > 0, \quad \alpha > 0;$$

$$2) \quad \varphi(x) = x^\alpha, \quad x > 0, \quad \alpha > 0;$$

$$3) \quad \varphi(x) = P_n(x), \quad \text{где } P_n(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0, \quad a = a_n > 0 \quad - \text{ произвольный многочлен } n\text{-й степени, } n = 1, 2, \dots$$

Так, результаты пп. 5 – 8 настоящей работы верны для обобщенного интеграла Пуассона

$$(f * P_h)(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) P_h(x-t) dt$$

с интегральным ядром

$$P_h(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-h|k|^\alpha) \exp(ikx), \quad \alpha > 0;$$

классический интеграл Пуассона соответствует случаю $\alpha = 1$.

10. Обобщения и распространения

1) *Суммируемость рядов Фурье*. Пусть выполнено дополнительное условие

$$\lambda_k(h) = O\left(\frac{1}{\ln k}\right), \quad k \rightarrow \infty. \quad (10.1)$$

Тогда (см. [10]) семейство

$$V_h(f) = V(f, x; \lambda, h) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{|k|}(h) c_k(f) \exp(ikx)$$

λ -средних ряда Фурье произвольной функции $f(x) \in L(Q)$, обладающей коэффициентами Фурье $c_k(f)$, может быть представлено в виде (ср. (5.4))

$$V(f, x; \lambda, h) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \Delta^2 \lambda_k(h) \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) F_k(t) dt.$$

Следовательно, оценки пп. 5–7 и вытекающие из них теоремы о сходимости применимы к квазивыпуклым методам суммирования рядов Фурье, причем условие (10.1) является не только одним из достаточных, но и необходимым для суммируемости почти всюду (именно, в точках Лебега, см. [5]). Рассмотрение же семейств операторов свертки в виде (1.2) позволяет освободиться от требования (10.1).

2) *Двухвесовые оценки*. Оценка (7.5) и ее следствия могут быть перенесены на случай весовых L^p -пространств ($p \geq 1$). Анонсируем соответствующий результат.

Пусть μ и ν – конечные на Q борелевские меры, инвариантные относительно сдвигов на 2π , $\omega(x)$ – производная абсолютно непрерывной части меры ν , I – произвольный замкнутый интервал с мерой $|I| \leq 2\pi$. Положим

$$\|f\|_{\nu, p} = \left(\int_Q |f(t)|^p d\nu(t) \right)^{\frac{1}{p}}$$

и

$$A_{\mu, \nu}^{(p, q)} = \sup_I \frac{\mu^q(I)}{|I|} \left(\frac{1}{|I|} \int_I \omega^{-\frac{1}{p-1}}(t) dt \right)^{\frac{p-1}{p}}, \quad q \geq 1, \quad p \geq 1,$$

причем множитель

$$\left(\frac{1}{|I|} \int_I \omega^{-\frac{1}{p-1}}(t) dt \right)^{\frac{p-1}{p}} \quad \text{при } p=1 \text{ считаем равным } \operatorname{ess\,sup}_{x \in I} \frac{1}{\omega(x)}.$$

Считаем также $0 \cdot \infty = \infty$ и $(f * K_h) = \infty$, если f не суммируема на Q .

Теорема 10.1. Пусть выполнены условия (2.2) – (2.4). Тогда при всех $q \geq 1$, $p \geq 1$ имеет место оценка

$$\sup_{h>0} \|f * K_h\|_{\mu, q} \leq C_{\lambda, p, q} A_{\mu, \nu}^{(p, q)} \|f\|_{\nu, p}.$$

3) *Многомерный случай*. Аналогии результатов настоящей работы могут быть получены и в случае функций нескольких переменных, чему автор надеется посвятить отдельную статью.

Список литературы

1. Никольский, С. М. О линейных методах суммирования рядов Фурье / С. М. Никольский // Изв. АН СССР. Серия математическая. – 1948. – Т. 12, № 3. – С. 259 – 278.
2. Nagy, B. Sz. Methodes de Sommation des Series de Fourier / B. Sz. Nagy // Acta Sci. Math. Szeged, XII, pars. B. – 1950. – P. 204 – 210.
3. Karamata, J. Sur la sommation des series de Fourier des fonctions continue / J. Karamata, M. Tomic // Publ. Inst. Math. Acad. Serbe scL. – 1955. – No. 8. – P. 123 – 138.
4. Ефимов, А. В. О линейных методах суммирования рядов Фурье / А. В. Ефимов // Изв. АН СССР. Серия математическая. – 1960. – Т. 24, № 5. – С. 743 – 756.
5. Баусов, Л. И. О линейных методах суммирования рядов Фурье / Л. И. Баусов // Математический сборник. – 1965. – Т. 68 (110), № 3. – С. 313 – 327.
6. Фомин, Г. А. О линейных методах суммирования рядов Фурье / Г. А. Фомин // Математический сборник. – 1964. – Т. 65 (107), № 1. – С. 144 – 152.
7. Нахман, А. Д. Экспоненциальные методы суммирования рядов Фурье / А. Д. Нахман // XI Всесоюзная школа по теории операторов в функциональных пространствах : тезисы докладов, 26 – 30 мая 1986 г., Челябинск. – Челябинск, 1986. – Ч. 2. – С. 91.
8. Нахман, А. Д. Элементарные оценки весовых норм операторов свертки / А. Д. Нахман // Известия вузов. Математика. – 1989. – № 10. – С. 76 – 79.
9. Хилле, Е. Функциональный анализ и полугруппы : пер. с англ. / Е. Хилле, Р. Филлипс. – 2-е изд., перераб. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. – 829 с.
10. Нахман, А. Д. Экспоненциальные методы суммирования рядов Фурье / А. Д. Нахман, Б. П. Осиленкер // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 101 – 109.
11. Тригуб, Р. М. Обобщение метода Абеля–Пуассона суммирования тригонометрических рядов Фурье / Р. М. Тригуб // Математические заметки. – 2014. – Т. 96, № 3. – С. 473 – 475.
12. Зигмунд, А. Тригонометрические ряды : пер. с англ. : в 2 т. / А. Зигмунд. – М. : Мир, 1965. – 2 т.
13. Muckenhoupt, B. Two Weight Function Norm Inequalities for the Poisson Integral / B. Muckenhoupt // Trans. Amer. Math. Soc. – 1975. – Vol. 210. – P. 225 – 231.
14. Nakhman, A. D. Weighted Norm Inequalities for the Convolution Operators / A. D. Nakhman // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 653 – 660.

Restriction of Families of Conversion Operators in L^p Spaces

A. D. Nakhman

*Department of Higher Mathematics, alexymb@mail.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: quasiconvex coefficients; maximum marks; convolution operators.

Abstract: We study a one-parameter family of convolutional operators acting in Lebesgue L^p spaces. The case of integral kernels given by the Fourier coefficients is considered. It is established that the condition of the coefficients being quasiconvex

ensures the boundedness of the corresponding maximal operators. The limiting behavior of families in the metrics of spaces of continuous functions and L^p , $p \geq 1$, classes is studied, and their convergence is obtained almost everywhere. The ways of possible generalizations and distributions are indicated.

References

1. Nikol'skiy S.M. [On linear methods of summability of Fourier series], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya matematicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Mathematical series], 1948, vol. 12, no. 3, pp. 259-278. (In Russ.)
2. Nagy B.Sz. Methodes de Sommation des Series de Fourier, *Acta Sci. Math. Szeged*, XII, pars. B, 1950, pp. 204-210.
3. Karamata J., Tomic M. Sur la sommation des series de Fourier des fonctions continue, *Publ. Inst. Math. Acad. Serbe scL*, 1955, no. 8, pp. 123-138.
4. Yefimov A.V. [On linear methods of summation of Fourier series], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya matematicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Mathematical series], 1960, vol. 24, no. 5, pp. 743-756. (In Russ.)
5. Bausov L.I. [On linear methods of summation of Fourier series], *Matematicheskiiy sbornik* [Mathematical collection], 1965, vol. 68 (110), no. 3, pp. 313-327. (In Russ.)
6. Fomin G.A. [On linear methods of summation of Fourier series], *Matematicheskiiy sbornik* [Mathematical collection], 1964, vol. 65 (107), no. 1, pp. 144-152. (In Russ.)
7. Nakhman A.D. [Exponential methods of summation of Fourier series], *XI Vsesoyuznaya shkola po teorii operatorov v funktsional'nykh prostranstvakh* [XI All-Union School on the Theory of Operators in Functional Spaces], Abstracts, 26 - 30 May, 1986, Chelyabinsk, 1986, Part 2, p. 91. (In Russ.)
8. Nakhman A.D. [Elementary estimates for the weighted norms of convolution operators], *Izvestiya vuzov. Matematika* [Izvestiya vuzov. Mathematics], 1989, no. 10, pp. 76-79. (In Russ.)
9. Khille Ye., Phillips R. *Funktsional'nyy analiz i polugruppy* [Functional analysis and semigroups], Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1962, 829 p. (In Russ.)
10. Nakhman A.D., Osilenker B.P. [Exponential methods of summation of Fourier series], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 101-109. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Trigub R.M. [Generalization of the Abel–Poisson method of summation of trigonometric Fourier series], *Matematicheskkiye zametki* [Math notes], 2014, vol. 96, no. 3, pp. 473-475. (In Russ.)
12. Zygmund A. *Trigonometric series*, Cambridge University Press, 1959.
13. Muckenhoupt B. Two Weight Function Norm Inequalities for the Poisson Integral, *Trans. Amer. Math. Soc.*, 1975, vol. 210, pp. 225-231.
14. Nakhman A.D. Weighted Norm Inequalities for the Convolution Operators, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 3, pp. 653-660. (In Eng., abstract in Russ.)

Beschränktheit von Familien der Faltungsoperatoren in L^p -Räumen

Zusammenfassung: Es wird eine einzelparametrische Familie von Faltungsoperatoren, die in Lebesgue-Räumen L^p wirken, untersucht. Der Fall von integralen Kernen, gegeben durch die Fourier-Koeffizienten, ist betrachtet. Es ist festgestellt, dass die Bedingung der Quasikonvexität der Koeffizienten

die Beschränktheit der entsprechenden maximalen Operatoren gewährleistet. Das Grenzverhalten von Familien in Metriken von Räumen stetiger Funktionen, der Klassen L^p , $p \geq 1$, ist untersucht, und Konvergenz ist fast überall erreicht. Die Wege möglicher Verallgemeinerungen und Verteilungen sind angegeben.

Contraintes des familles d'opérateurs de convolution dans les espaces L^p

Résumé: Est étudiée une famille d'opérateurs convolutifs à un seul paramètre agissant dans les espaces de Lebesgue. Est examiné le cas des noyaux intégraux donnés par les coefficients de Fourier. Est établi que la condition de quasi-bulle des coefficients permet de limiter les opérateurs maximaux correspondants. Est étudié le comportement marginal des familles dans les métriques des espaces de fonctions continues, des classes L^p , $p \geq 1$; est obtenue la convergence presque partout. Sont indiquées les voies de généralisations et de diffusion possibles.

Автор: *Нахман Александр Давидович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДСТВАХ КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

А. Д. Лоскутова¹, А. П. Королев²

*Кафедры: «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (1),
«Материалы и технология» (2), korolevanpal@yandex.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: выходная характеристика; инфракрасное излучение; КМДП-структура; полупроводниковая полевая структура; термопреобразователи; термочувствительный элемент; электрофизические параметры.

Аннотация: Проведен анализ характеристик термочувствительных элементов, используемых в приборах для контроля температуры и теплофизических свойств среды и материалов. Рассмотрены термопреобразователи из различных материалов: металлов, полупроводников, оксидов. Проанализирована чувствительность к инфракрасному излучению рассматриваемых элементов. Исследованы диапазон измеряемых температур и линейность выходной характеристики преобразователей. Сделан вывод о целенаправленности использования того или иного типа термочувствительных элементов.

Термочувствительный элемент (ТЧЭ) является очень важной конструкционной составляющей приборов, предназначенных для измерения теплофизических свойств материалов. Термочувствительные элементы созданы на материалах, электрофизические свойства которых зависят от температуры. У однородных структур ТЧЭ основной характеристикой, зависящей от температуры, является удельное сопротивление. Гетероструктуры ТЧЭ, которые созданы из полупроводниковых материалов, реагируют на изменение температуры ростом или падением электрического напряжения на структуре или величины электрического тока.

Существует класс термометров сопротивления, представляющих собой проволоочную конструкцию из металла, который должен обладать такими характеристиками, как большой температурный коэффициент сопротивления, высокая температура плавления, однородность микроструктуры, высокое удельное сопротивление при нормальных условиях, стойкость к химическому воздействию. По таким параметрам наиболее подходящими являются платина и медь.

Металлические термометры сопротивления имеют недостатки, которыми не обладают, например, ТЧЭ из монокристаллических полупроводников. Медь из-за высокой склонности к окислению при повышенной температуре пригодна для чувствительного элемента, применяемого при измерении температуры до 180 °С. В неокисляющей среде и вакууме медный элемент можно использовать

до 500 °С. Платина имеет более высокие границы измеряемых температур. На воздухе ТЧЭ из платины можно измерять температуры до 450 °С, в вакууме – до 1000 °С. Но измерение высоких температур в вакууме должно быть как можно более кратковременным, чтобы избежать заметного распыления металла. Для измерения высоких температур в вакууме можно использовать тугоплавкие металлы, однако они имеют низкий температурный коэффициент удельного сопротивления, что понижает чувствительность элемента. К недостаткам всех металлических ТЧЭ относится низкое удельное сопротивление материала, что осложняет коммутацию в цепи прибора для измерения теплофизических характеристик материалов и сред. На рисунке 1, а, изображены зависимости удельного сопротивления металлов, применяемых для изготовления ТЧЭ, от температуры [1]. Конкуренцию металлическим ТЧЭ могут составить полупроводниковые терморезисторы из нестехиометрических и оксидных химических соединений, которые имеют значительно выше температурный коэффициент сопротивления. На рисунке 1, б, показаны зависимости удельного сопротивления оксидных материалов, используемых в терморезисторах, от температуры [1].

Терморезисторы склонны к старению – изменению характеристик со временем, что требует поверки и градуировки. Более значительным сроком службы и широким диапазоном измеряемых температур (от –269 до 3000 °С) отличаются термопары, но они обладают рядом недостатков: в точности измерения; из-за слабого сигнала высокий уровень шумов; теплоотвод; неоднородная микроструктура проволок и механические напряжения, вызванные изготовлением проволочных термопар и др.

Значительные преимущества имеют ТЧЭ на монокристаллических полупроводниках: низкий уровень шумов, широкий диапазон измеряемых температур на воздухе, практически отсутствие теплоотдачи и др. Измерение высоких температур на воздухе обеспечивается низкой склонностью к окислению полупроводника. При взаимодействии с воздухом на поверхности кремня образуется оксид толщиной 0,01 мкм, который дальше не растет, являясь маской для диффузии кислорода к границе раздела «кремний – оксид кремния». Оксид полупроводника, если он требуется в полупроводниковой технике и технологии, выращивается в специальных условиях.

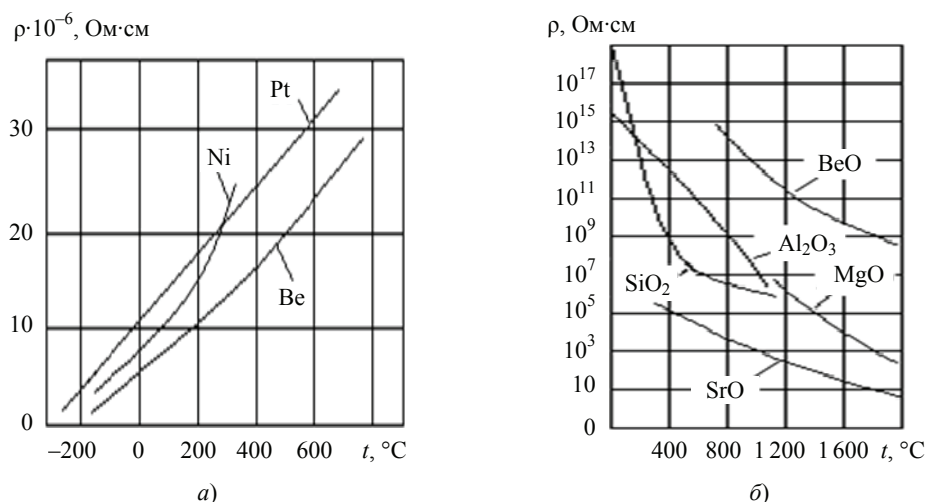


Рис. 1. Зависимости удельного сопротивления металлов для ТЧЭ (а) и оксидных материалов (б) от температуры

Применение для измерения температуры находят структуры с p - n -переходом. С температурой меняется обратный ток через p - n -переход. Зависимости представлены на рис. 2 [1].

На координатных плоскостях заштрихованные области имеют характеристики одной серии диодов. Из графиков видно, что диапазон измеряемых температур узкий и составляет всего около 40 °С. Это объясняется тем, что обратный ток при резком увеличении своего значения может привести к пробоем p - n -перехода. Однако, согласно температурной характеристике обратного тока, чувствительность диодов высока.

Существуют варианты применения и транзисторных полевых структур для измерения теплофизических параметров сред, но использование единичного транзистора не пригодно. Структура транзистора обеспечивает практически постоянный электрический ток при изменении температуры в рабочем диапазоне, то есть прибор не чувствителен к изменению температуры. Принцип измерения температуры основан на термогенерации носителей заряда в полупроводнике, однако полевые транзисторы работают в режиме инверсии, в котором в проводящем канале происходит насыщение носителями при пороговом напряжении. Количество заряженных свободных частиц в этом случае максимально, и термогенерация не приводит к увеличению их концентрации. Следовательно, электрический ток через транзистор с изменением температуры не меняется в рабочем диапазоне. Для проверки данного высказывания следует провести математический анализ выходной характеристики МДП-транзистора. От температуры зависят электрофизические параметры. Пороговое напряжение выражается зависимостью [2]

$$V_T = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{Si}qN_A(2\psi_B)}}{C_i},$$

где ψ_B – разность между собственным уровнем и уровнем Ферми в режиме сильной инверсии [3, 4]; $\varepsilon_0, \varepsilon_{Si}$ – диэлектрические проницаемости абсолютная и кремния соответственно, Ф/см; q – элементарный заряд, Кл; N_A – концентрация акцепторной примеси, см⁻³; C_i – емкость оксидного слоя под затвором, Ф.

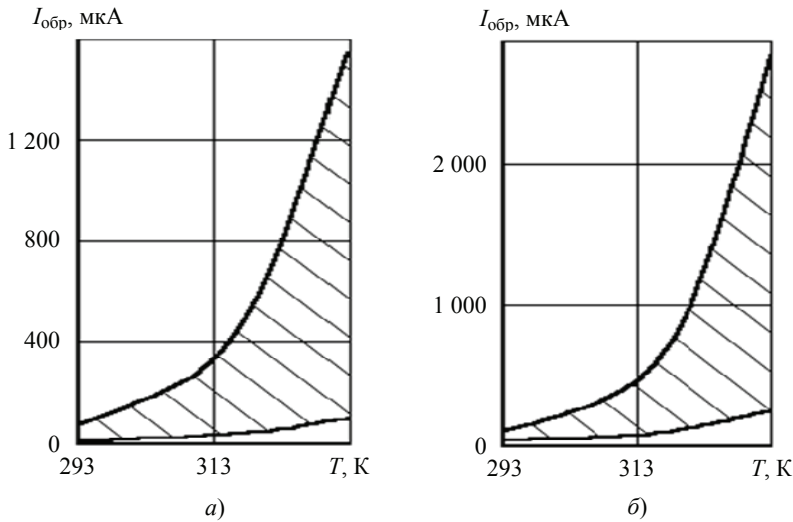


Рис. 2. Температурные характеристики диодов:
а – серии Д7; б – типа Д302

После преобразования [3, 4] данное выражение примет вид

$$V_T = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} + \frac{\sqrt{4\epsilon_0\epsilon_{Si}qN_A \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}}}{\frac{\epsilon_0\epsilon_{SiO_2}}{d_i}}, \quad (1)$$

где n_i – собственная концентрация электронов, см^{-3} ; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура, К; d_i – толщина подзатворного диэлектрика, см.

Выражение для выходного тока транзистора [2]

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T) V_D,$$

где Z и L – ширина и длина канала транзистора, см; μ_n – подвижность электронов в структуре, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; V_G , V_D – напряжения на затворе и стоке, В, соответственно.

Подставив в данную формулу выражение (1) [3, 4], получим

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n \frac{\epsilon_0\epsilon_{SiO_2}}{d_i} \left(V_G - \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} - \frac{\sqrt{4\epsilon_0\epsilon_{Si}qN_A \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}}}{\frac{\epsilon_0\epsilon_{SiO_2}}{d_i}} \right). \quad (2)$$

Подвижность электронов μ_n уменьшается с ростом температуры [3, 4]. Рассчитаем характеристику (2) в зависимости от температуры для электрических и физико-топологических параметров транзистора:

- концентрации акцепторной примеси в подложке $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- толщины подзатворного диэлектрика $d_i = 3 \times 10^{-6} \text{ см}$;
- ширины канала $Z = 5 \times 10^{-1} \text{ см}$;
- длины канала $L = 5 \times 10^{-5} \text{ см}$;
- напряжения на затворе $V_G = 10 \text{ В}$.

Зависимость выходного тока транзистора от температуры представлена на рис. 3 для разных потенциалов на стоке V_D .

Из рассчитанных и приведенных на графике характеристик видно, что ток через транзистор не меняется с изменением температуры до 400 К или до 127 °С. Затем резко падает из-за уменьшения подвижности электронов с ростом температуры. Таким образом, использовать единичный транзистор для измерения температуры нельзя.

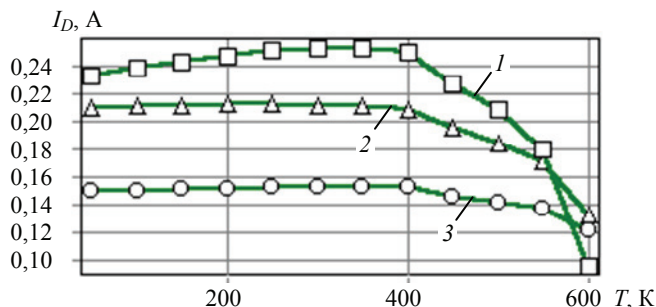


Рис. 3. Зависимость выходного тока транзистора от температуры для разных значений напряжения, В, на стоке:

1 – 5; 2 – 7; 3 – 9

Известно применение КМДП-транзисторов в космической технике для измерения температуры [5]. Предлагаемый КМДП-датчик температуры имеет хорошую линейность в температурном диапазоне от -60°C до 150°C с погрешностью $1,8^{\circ}\text{C}$. Эта схема работает при питании 1 В и потребляет энергию 40 нВт при 150°C . Датчики температуры обычно делятся на два типа: обычные и интеллектуальные. Обычные датчики температуры имеют многочисленные недостатки по сравнению с интеллектуальными, специально изготовленными по технологии КМДП, потребляющие больше энергии из-за большей площади, меньшей точности и нелинейности [5]. Интеллектуальный датчик температуры может напрямую взаимодействовать с микроконтроллером или микропроцессором в стандартном цифровом формате, что приводит к снижению сложности и повышению быстродействия системы. Схема интеллектуального датчика температуры КМДП состоит из схемы термоэлемента, его схемы формирования сигнала и аналого-цифрового преобразователя [5].

Выходная характеристика КМДП-термопреобразователя описывается зависимостью [5]

$$I_D = \frac{\mu_n C_{\text{SiO}_2} Z}{2L} \left[\frac{V_G - V_T}{1 + \left(\frac{\mu}{2LV_{\text{sat}}} + \theta \right)} \right], \quad (3)$$

где C_{SiO_2} – емкость оксида кремния, Ф; V_{sat} – постоянная скорость насыщения, м/с, $V_{\text{sat}} = \mu_n E$; E – напряженность электрического поля, В/м; θ – подгоночный параметр, определяемый экспериментально.

Выражение (3) аналогично (2), но, если использовать для измерения температуры МДП-структуру не в режиме инверсии, как транзистор, а в режиме обогащения, как резистор, управляемый потенциалом на затворе [3, 4], зависимость, представленная на рис. 3, будет выглядеть по-другому. Зависимость тока стока I_D от температуры будет возрастать с разной крутизной графиков, которая зависит от уровня легирования кремниевой подложки, как показано на рис. 4, где ширина канала $Z = 1$ мкм, длина канала $L = 0,5$ мкм, $V_D = 9$ В, $V_G = 10$ В, толщина диэлектрика $d = 0,03$ мкм [4].

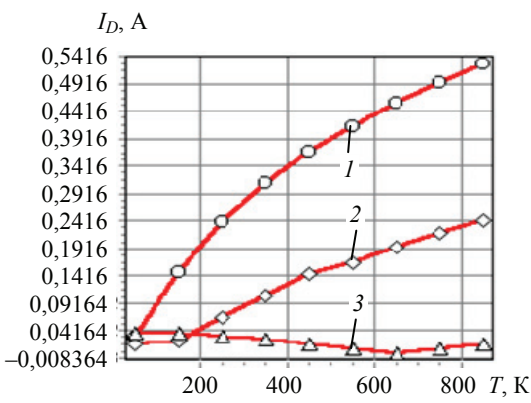


Рис. 4. Зависимость выходного тока I_D от температуры для различных концентраций примеси в подложке N_D :

1 – собственный кремний; 2 – легированный $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 – легированный $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

На вид выходной характеристики влияют не только уровень легирования подложки, но и физико-топологические и электрофизические параметры [4]. Таким образом, анализируя зависимости, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод о возможности использования единичной МДП-структуры для измерения температуры как интеллектуального термочувствительного элемента.

Список литературы

1. Коленко, Е. А. Технология лабораторного эксперимента : справ. / Е. А. Коленко. – СПб. : Политехника, 1994. – 751 с.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов : в 2-х кн. / С. Зи ; пер. с англ. В. А. Гергеля [и др.] ; под ред. Р. А. Сурица. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1984. – 455 с.
3. Яцинин, Ю. В. Образование заряда в квантовой яме в полевой структуре / Ю. В. Яцинин, А. П. Королев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 525 – 528.
4. Брусенцов, Ю. А. Исследование электрофизических процессов в полевых полупроводниковых структурах для измерения теплофизических характеристик / Ю. А. Брусенцов, А. П. Королев, А. В. Озаренко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 1. – С. 122 – 128.
5. Pandey, A. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications / A. Pandey, V. Nath // TELKOMNIKA. – 2015. – Vol. 13, No. 3. – P. 813 – 819.

The Analysis of Properties of Thermal Sensitive Elements in Measuring Devices for Thermal Properties of Materials

A. D. Loskutova¹, A. P. Korolev²

*Departments of Criminal Law and Applied Informatics in Jurisprudence (1),
Materials and Technology (2), korolevanpal@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: output characteristic; infrared radiation; semiconductor field structure; thermal converters; thermosensitive element; electrophysical parameters.

Abstract: The analysis of properties of thermosensitive elements used in devices for monitoring the temperature and thermophysical properties of the medium and materials is carried out. Thermal converters made of various materials are considered: metals, semiconductors, oxides. The sensitivity to infrared radiation of the considered elements is analyzed. The range of measured temperatures and the linearity of the output characteristics of the converters are investigated. A conclusion is made about the purposefulness of using one or another type of thermosensitive elements.

References

1. Kolenko Ye.A. *Tekhnologiya laboratornogo eksperimenta: spravochnik* [Laboratory experiment technology: reference book], St. Petersburg: Politekhnik, 1994, 751 p. (In Russ.)
2. Zi S., Suris R.A. [Ed.] *Fizika poluprovodnikovyykh priborov: v 2-kh kn.* [Physics of semiconductor devices: in 2 books], Moscow: Mir, 1984, 455 p. (In Russ.)

3. Yatsinin Yu.V., Korolev A.P. [Charge formation in a quantum well in a field structure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 525-528. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Ozarenko A.V. [Investigation of electrophysical processes in field semiconductor structures for measuring thermophysical characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 122-128. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Pandey A., Nath V. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications, *TELKOMNIKA*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 813-819.

Analyse der Eigenschaften wärmeempfindlicher Elemente bei der Überwachung der thermophysikalischen Eigenschaften von Materialien

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Eigenschaften von thermosensitiven Elementen, die in Geräten zur Überwachung der Temperatur und der thermophysikalischen Eigenschaften von Medium und Materialien verwendet werden, durchgeführt. Betrachtet sind Wärmewandler aus verschiedenen Materialien: Metallen, Halbleitern, Oxiden. Die Empfindlichkeit der betrachteten Elemente gegenüber Infrarotstrahlung ist analysiert. Der Bereich der gemessenen Temperaturen und die Linearität der Ausgangskennlinie der Wandler sind untersucht. Es ist die Schlussfolgerung über die Zweckmäßigkeit der Verwendung dieser oder jener Art von wärmeempfindlichen Elementen gezogen.

Analyse des caractéristiques des éléments thermosensibles dans les moyens de contrôles des propriétés thermiques des matériaux

Résumé: Est effectuée une analyse des caractéristiques des éléments thermosensibles utilisés dans les instruments de contrôle de la température et des propriétés thermiques du milieu et des matériaux. Sont examinés les thermoconducteurs fabriqués à partir de divers matériaux: métaux, semi-conducteurs, oxydes. Sont analysées la sensibilité au rayonnement infrarouge des éléments considérés. Est étudiée la gamme de température mesurée et la linéarité de la sortie des transducteurs. Est donnée la conclusion sur l'utilisation d'un type particulier d'élément sensible à la chaleur.

Авторы: *Лоскутова Анна Давидовна* – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНОПОЛИСТИРОЛА И МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В. П. Ярцев, А. А. Крюкова

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», jarcev21@rambler.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: минеральная вата; пенополистирол; распределение температур; тепловые потери; теплопоступления.

Аннотация: В программе ArchiCAD 19 на основании проектной документации по объемно-планировочному решению строений выполнено исследование распределения температурных полей и потоков энергии, проходящих в период эксплуатации через ограждающие конструкции с утеплением из пенополистирола и минеральной ваты.

Проведено исследование распределения температур по толщине ограждающих конструкций и потоков энергий двух одноэтажных зданий при различном решении ограждающих конструкций кровли. Параметры моделей исследованных зданий задавались в программе ArchiCAD 19 на основании проектной документации по объемно-планировочному решению строений (рис. 1).

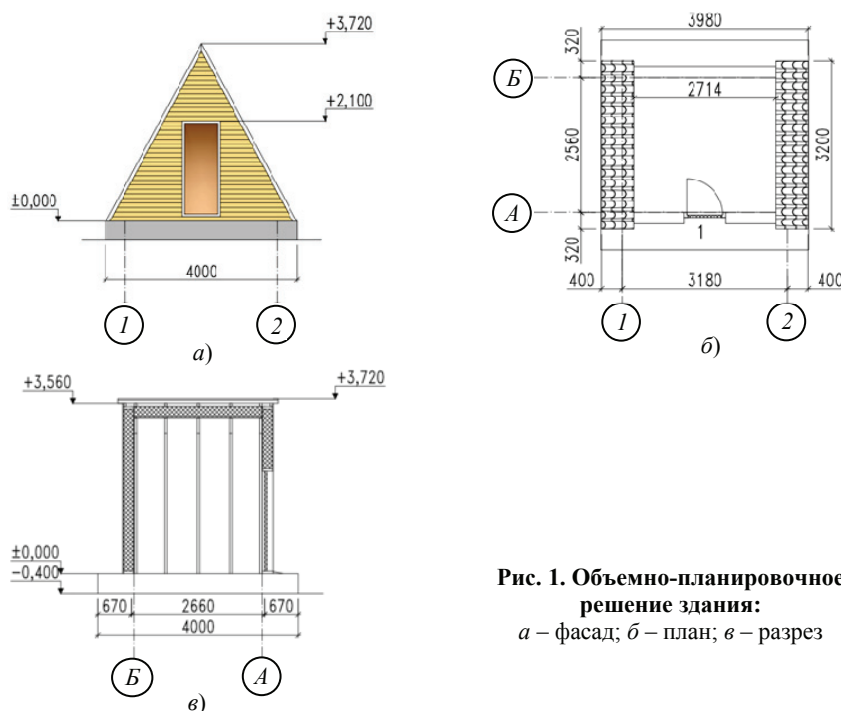


Рис. 1. Объемно-планировочное решение здания:
а – фасад; б – план; в – разрез

Исследованы варианты, которые имеют практически одинаковые габаритные размеры и высоту (рис. 2). Несколько отличается по высоте вариант 1. Это было сделано в целях выравнивания объемов внутреннего пространства дома, в связи с конструктивным решением расположения несущих конструкций кровли, которые снижают объем внутреннего пространства помещения [1, 2].

В программе ArchiCAD 19 имеется возможность моделирования распределения температурных полей в ограждающих конструкциях теплозащитной оболочки здания, а также потоков энергии, проходящих через нее в период эксплуатации.

На рисунке 3, а – в, представлен анализ температурных полей и потоков энергии в местах сопряжения дверного проема с ограждающими конструкциями. Решения узлов сопряжения дверного проема с ограждающими конструкциями по варианту 1 и 2 аналогичны друг другу. Рассматриваемые места имеют конструктивное решение и уровень теплозащиты, исключающие образование мостиков холода. Внутренняя температура помещения не допускает выпадения конденсата на поверхности внутри помещений, так как температура поверхности выше точки росы.

Сравнительный анализ температурных полей и потоков энергии в коньке (место сопряжения стропильных ног) показал, что вариант 1, с теплоизоляционным материалом пенополистиролом, лучше варианта 2, где теплоизоляционным материалом является минераловатные плиты (рис. 3, з, д). С позиции энергоэффективности вариант 2 более предпочтителен, так как теплопроводность древесины намного выше теплопроводности теплоизоляционного материала. Температура на внутренней поверхности конька ниже в зимний период эксплуатации, что приводит к дополнительным тепловпотерям через боковые поверхности кровли в коньке.

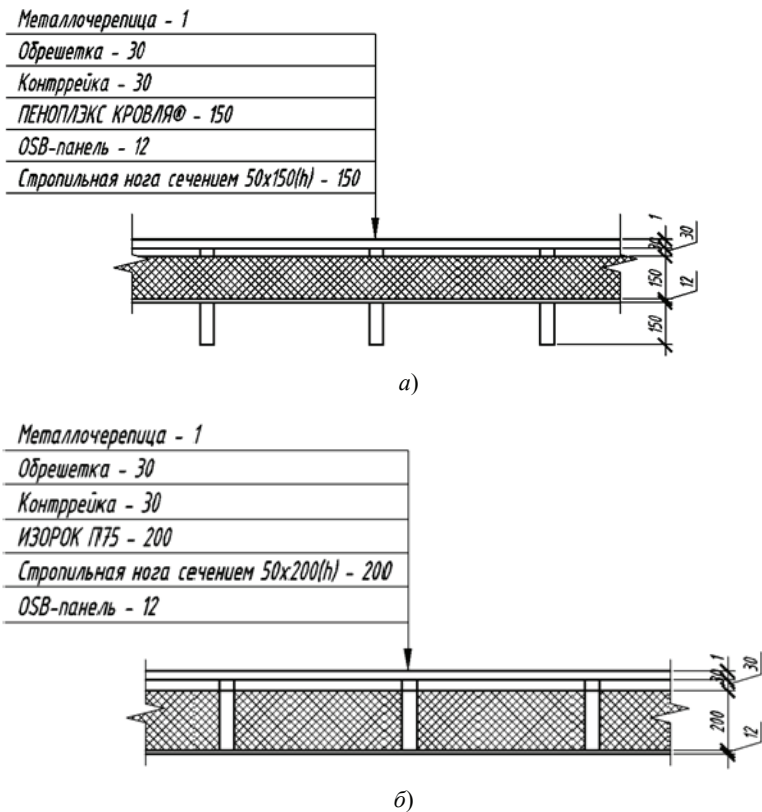


Рис. 2. Конструкция кровли дома по вариантам 1 (а) и 2 (б)

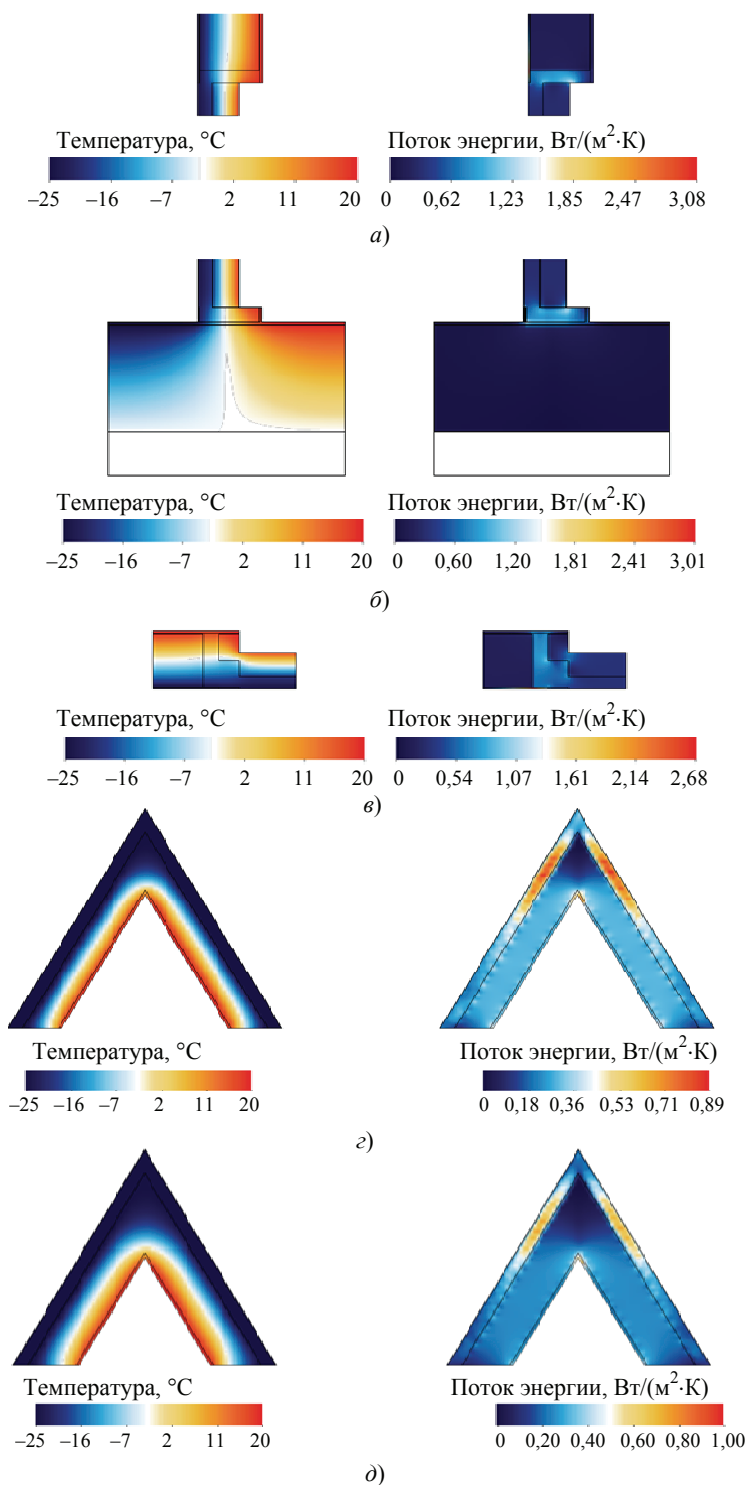


Рис. 3. Результаты моделирования температурного поля, °С, и потока энергии, Вт/(м²·К) в местах сопряжения соответственно верхней (а), нижней (б), боковой (в) частей дверного проема и стенового ограждения; кровли и стропильной системы по вариантам 1 (з) и 2 (д) (начало)

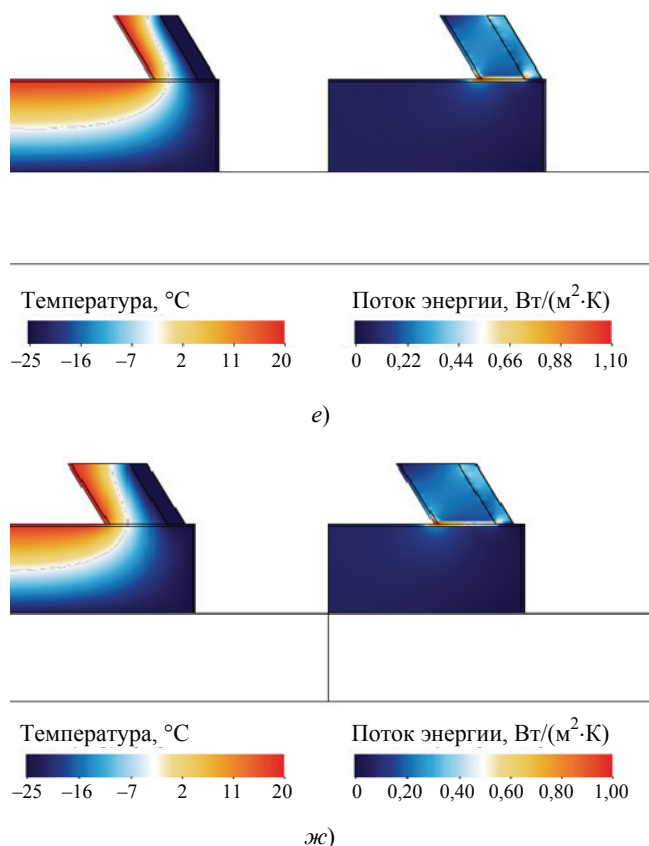


Рис. 3. Окончание. Результаты моделирования температурного поля, °С, и потока энергии, Вт/(м²·К) в местах сопряжения соответственно кровли и пола по вариантам 1 (е) и 2 (ж)

Результаты моделирования температурных полей и потоков энергии в местах сопряжения кровли и конструкции пола между стропильными ногами показаны на рис. 3, е, ж.

Конструктивное решение узлов и уровень теплозащиты двух вариантов домиков исключают образование мостиков холода. Внутренняя температура помещения предотвращает выпадение конденсата на поверхностях и внутренних слоях ограждающих конструкций, так как температура внутренних поверхностей выше точки росы. Температура воздуха в домиках автоматически поддерживалась не ниже требуемых санитарно-гигиенических норм.

Проведено исследование распределения величин теплопоступления и теплопотерь вариантами моделей домов в течение года в период эксплуатации на основе географического расположения г. Тамбова. Для расчета в программе ArchiCAD 19 задавалась 3D-модель домов на основании принятых объемно-планировочных и конструкционных решений ограждающих и несущих конструкций. Посредством функции «Просмотр энергетической модели» учитывались инженерные системы, имеющиеся в здании.

Теплопотери в здании происходят через ограждающие конструкции в окружающую среду [6]. На данный фактор сильно влияет показатель расчетного сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции.

Теплопоступления в здание осуществляются за счет теплопередачи энергии через ограждающие конструкции из окружающей среды, когда температура наружного воздуха выше нормированной температуры внутри помещения [6] и системы отопления.

Теплопотери происходят за счет теплопередачи энергии через ограждающие конструкции в окружающую среду и работы системы вентиляции воздуха.

Суммарно поступающая и суммарно затрачиваемая энергии представлены в виде графиков (рис. 4). Как видно из графика, вариант 1 оказывается наиболее энергоэффективным. Разница по теплопоступлениям и теплопотерям у вариантов незначительна и составляет 2,6 %.

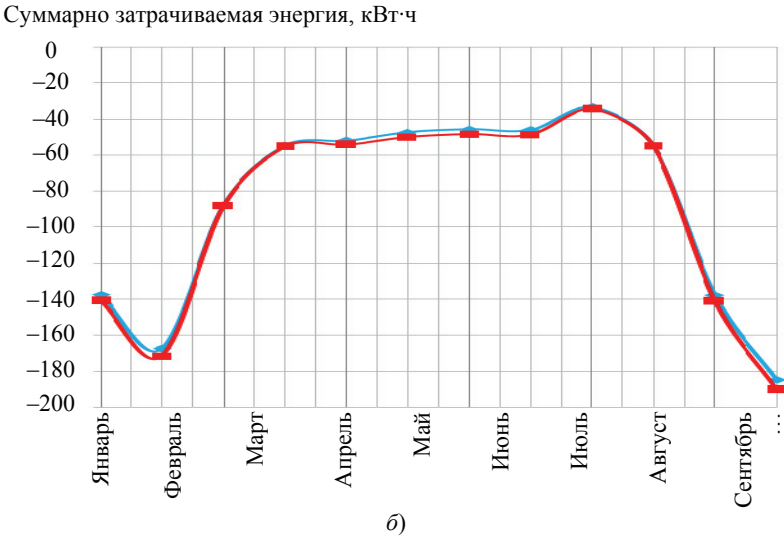


Рис. 4. Суммарно поступающая энергия (а) и суммарно затрачиваемая энергии (б) (вариант 1– утепление кровли материалом «ПЕНОПЛЭКС КРОВЛЯ»; вариант 2 – «ИЗОРОК П-75»):

—♦— вариант 1 —■— вариант 2

Наличие в ограждающих конструкциях теплозащитной оболочки здания мостиков холода, имеющих более высокий коэффициент теплопроводности, чем у основного материала теплоизоляционного слоя, приводит в результате к перерасходу энергии на поддержании в доме комфортных условий выбранного режима эксплуатации помещения.

Из анализа полученных результатов видно, что вариант 2 модели домика проигрывает варианту 1 из-за наличия в конструкции кровли мостиков холода в местах расположения стропильных ног. В общем и целом, конструктивное решение ограждающей конструкции кровли теплозащитной оболочки дома по варианту 2 удовлетворяет нормам [6 – 8] по тепловой защите зданий, хотя и уступает варианту 1 с позиции энергоэффективности в плане решения ограждающей конструкции кровельного покрытия.

Список литературы

1. Об энергетическом потреблении зданий в отопительный период / В. П. Ярцев, С. А. Струлев, А. А. Мамонтов, И. А. Струлева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2019. – № 9-10 (248-249). – С. 30 – 32.
2. Ярцев, В. П. К вопросу оценки энергетической эффективности ограждающих конструкций малоэтажных зданий / В. П. Ярцев, А. А. Мамонтов, С. А. Струлев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2019. – № 1-2 (240-241). – С. 24 – 27.
3. Ярцев, В. П. Сравнительный анализ эффективности применения утеплителей в каркасном домостроении / В. П. Ярцев, А. А. Мамонтов // Кровельные и изоляционные материалы. – 2016. – № 6. – С. 32 – 35.
4. Ярцев, В. П. Влияние внешних воздействий на теплофизические и длительные механические свойства минераловатных плит / В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов, А. А. Мамонтов // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – №1 (50). – С. 125 – 134.
5. СП 23-101-2004. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий. – Взамен СП 23-101-2000 ; введ. 2004-06-01. – М. : ФГУ ЦПП, 2004. – 145 с.
6. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введ. 2013-07-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 100 с.
7. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минстрой России, 2015. – 124 с.
8. Анализ экономической целесообразности применения различных ограждающих конструкций зданий / В. П. Ярцев, С. А. Струлев, А. А. Мамонтов [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2018. – № 7-8 (234-235). – С. 24 – 27.

The Comparison of Thermal Characteristics of Polystyrene Foam and Mineral Wool under Atmospheric Impact

V. P. Yartsev, A. A. Kryukova

*Department of Structures of Buildings and Structures, jarcev21@rambler.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: mineral wool; expanded polystyrene; temperature distribution; heat losses; heat gain.

Abstract: In the ArchiCAD 19 software, on the basis of design documentation for the space-planning solution of buildings, a study of the distribution of temperature fields and energy flows passing through enclosing structures with insulation from expanded polystyrene and mineral wool during operation was conducted.

References

1. Yartsev V.P., Strulev S.A., Mamontov A.A., Struleva I.A. [On the energy consumption of buildings during the heating period], *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century], 2019, no. 9-10 (248-249), pp. 30-32. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Yartsev V.P., Mamontov A.A., Strulev S.A. [On the issue of assessing the energy efficiency of enclosing structures of low-rise buildings], *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century], 2019, no. 1-2 (240-241), pp. 24-27. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Yartsev V.P., Mamontov A.A. [Comparative analysis of the effectiveness of the use of heaters in frame housing construction], *Krovel'nyye i izolyatsionnyye materialy* [Roofing and insulating materials], 2016, no. 6, pp. 32-35. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Yartsev V.P., Mamontov S.A., Mamontov A.A. [Influence of external influences on thermophysical and long-term mechanical properties of mineral wool slabs], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no.1 (50), pp. 125-134. (In Russ., abstract in Eng.)
5. SP 23-101-2004. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitel'stvu. Proyektirovaniye teplovoy zashchity zdaniy* [SP 23-101-2004. A set of rules for design and construction. Design of thermal protection of buildings], Moscow: FGU TSPP, 2004, 145 p. (In Russ.)
6. SP 50.13330.2012. *Svod pravil. Teplovaya zashchita zdaniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 23-02-2003* [SP 50.13330.2012. Set of rules. Thermal protection of buildings. Updated edition of SNIp 23-02-2003], Moscow: Minregion Rossii, 2012, 100 p. (In Russ.)
7. SP 131.13330.2012. *Svod pravil. Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 23-01-99** [SP 131.13330.2012. Set of rules. Construction climatology. Updated edition of SNIp 23-01-99*], Moscow: Minstroy Rossii, 2015, 124 p. (In Russ.)
8. Yartsev V.P., Strulev S.A., Mamontov A.A., Struleva I.A., Zhrebtsov A.V., Popinako Ye.O. [Analysis of the economic feasibility of using various building envelopes], *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century], 2018, no. 7-8 (234-235), pp. 24-27. (In Russ., abstract in Eng.)

Vergleich der wärmetechnischen Eigenschaften von expandiertem Polystyrol und Mineralwolle bei Witterungseinflüssen

Zusammenfassung: Im Programm ArchiCAD 19 ist auf der Grundlage der Projektdokumentation zur raumplanerischen Lösung von Gebäuden die Verteilung von Temperaturfeldern und Energieströmen untersucht, die im Betrieb durch umschließende Konstruktionen mit Dämmung aus expandiertem Polystyrol und Mineralwolle geleitet werden.

Comparaison des caractéristiques thermiques de la mousse de polystyrène et de la laine de roche dans des conditions atmosphériques

Résumé: Dans le programme ArchiCAD 19 à la base des documents de conception de la décision sur la planification des bâtiments est effectuée une étude de la distribution des champs de température et de flux d'énergie dans une période qui inclut le fonctionnement avec la protection et l'isolation en mousse de polystyrène et la laine minérale.

Авторы: *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Крюкова Ангелина Андреевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Леденев Виктор Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ПРОИЗВОДСТВО ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩИХ СУСПЕНЗИЙ ЖИДКОФАЗНОЙ СДВИГОВОЙ ЭКСФОЛИАЦИЕЙ ГРАФИТА

Р. А. Аль-Джарах¹, В. Ф. Першин¹, А. А. Осипов²

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
pershin.home@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1);
АО «ЗАВКОМ» (2), г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: графит; малослойный графен; многослойный графен; сдвиговая эксфолиация; суспензия.

Аннотация: Разработаны способ и устройство для получения графеносодержащих суспензий жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита в непрерывном режиме. Проведено сравнение интенсивностей процесса эксфолиации графита в периодическом и непрерывном режимах и установлено, что интенсивность процесса эксфолиации в непрерывном режиме выше, чем в периодическом. Предельная концентрация графеновых структур в суспензии достигается в 1,5 раза быстрее при использовании аппарата, работающего в непрерывном режиме, чем в периодическом, и ее численное значение больше (минимум на 25 %).

Введение

С физической точки зрения, графен представляет собой двухмерную (2D) форму углеродного аллотропа, по существу монослой связанных sp^2 атомов углерода [1 – 3]. Его 2D-природа приводит к тому, что носители заряда ведут себя как релятивистские безмассовые дираковские фермионы [4, 5], подчиняющиеся линейной дисперсии энергии. Соответственно, графен проявляет исключительные свойства, такие как очень высокая подвижность поля [6, 7], аномальный квантовый эффект Холла [8, 9], беспрепятственное проникновение релятивистских частиц через высокие и широкие потенциальные барьеры (парадокс Клейна) [10], чрезвычайно высокое значение теплопроводности [12], и открытие новых уникальных свойств продолжается.

Не меньший, а возможно и больший интерес графен представляет в плане его использования в качестве модификатора при создании новых конструктивных и функциональных материалов. После открытия материалов на основе графена их активно применяют в различных областях, от электроники и медицины до строительства [13, 14]. Промышленное производство графена и его производных можно условно разделить на две большие группы: производство однослойного графена для малотоннажного применения (в оптике, медицине, электронике); производство графеновых пластин (малослойных и многослойных) для крупнотоннажного производства (строительных, полимерных, смазочных). Для первой группы разработано несколько способов получения графена, которые включают микромеханическое расщепление, топологический рост на металлической и неметаллической подложках.

Для второй группы наиболее перспективным многие исследователи считают жидкофазную эксфолиацию графита, в результате чего получают суспензию, содержащую графеновые пластины разной толщины и размеров [14, 15]. Расслоение в жидкой фазе – это многообещающий подход для реализации масштабируемого производства высококачественного графена или других слоистых материалов [16].

Таким образом, совершенствование технологии получения графеновых пластин жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита является актуальной задачей.

Материалы и методы

В качестве исходного материала для получения графеновых пластин использовали порошок кристаллического графита ГС-1 и ГС-2. В зависимости от дальнейшего применения графеносодержащих суспензий в качестве дисперсионной среды использовали: воду; масляные основы пластических смазок; отвердители эпоксидных смол. Поскольку водные суспензии в основном предназначены для модифицирования бетонов и строительных материалов, использовали техническую воду по ГОСТ 23732–2011. Как основу пластических смазок применяли масла: промышленное И20А; синтетическое полиальфаолефиновое; силиконовое (полиметилсилоксаны). Выбор масляных основ обоснован масштабностью их использования в промышленности. Из отвердителей эпоксидных смол использовали наиболее часто применяемые на практике полиэтиленполиамин и триэтилентетрамин.

Жидкофазную сдвиговую эксфолиацию обычно осуществляют в роторных аппаратах [17, 18]. Эксфолиация частиц графита осуществляется за счет сдвига, удара и среза. Удар и срез способствуют образованию дополнительных дефектов на базальной плоскости графена, что отрицательно влияет на его физико-механические характеристики. Разработан роторный аппарат с подвижными лопастями, работающий в непрерывном режиме [19], в котором расслоение частиц графита на графеновые пластины осуществляется только за счет сдвиговых воздействий. Для предотвращения агрегации графеновых пластин, при приготовлении водных суспензий использовали поверхностно-активные вещества, в частности пластификатор бетонных смесей СП-1.

Технология непрерывного производства графеновых пластин эксфолиацией графита

Роторный аппарат [17] содержит статор в виде цилиндрической оболочки с отверстиями для подвода и отвода суспензии, ротор с лопастями, привод вращения ротора. Аппарат помещают в емкость, заполненную водой, в которой взвешены частицы графита. Для предотвращения агрегации графеновых частиц в воду добавляют поверхностно активное вещество (ПАВ), например 2-метилпиралидон или холат натрия. Суспензия поступает в цилиндрический статор через верхний и нижний торец, раскручивается лопастями ротора и под действием центробежных сил выбрасывается из статора через отверстия в его боковой поверхности. Внутри статора создается разрежение, что способствует более интенсивному поступлению суспензии в статор через верхний и нижний торцы. При прохождении лопастями ротора отверстий в статоре, на частицы графита, попавшие в эту зону, действуют сдвиговые усилия, и происходит эксфолиация, то есть их расслаивание. При многократном воздействии образуются графеновые наноструктуры. Главные условия расслаивания частиц графита: зазор между лопастями и внутренней поверхностью статора не более 0,1 мм; скорость сдвига не менее 10^4 с^{-1} .

Недостатком данного способа и устройства является то, что процесс эксфолиации графита осуществляется периодически и нет возможности контролировать время пребывания суспензии в зоне между статором и вращающимся ротором. Попадание частиц графита в указанную зону происходит стохастически, поэтому не более 1 % графита преобразуется в графеновые структуры. Концентрация гра-

феновых структур в готовой суспензии после центрифугирования и удаления осадка не превышает 0,1 %. Под графеновыми структурами понимают частицы, содержащие до 15 графеновых слоев. Кроме этого, при прохождении через отверстия на частицы графита действуют ударные и срезающие нагрузки, что приводит к образованию дефектов на их базальных плоскостях. Используя устройство-прототип для получения графеносодержащей суспензии, с разным количеством отверстий в статоре, установили, что концентрация графеновых структур, образующихся в единицу времени, практически не зависит от числа отверстий. Таким образом, графеновые структуры в основном образуются при попадании частиц графена в зоны между статором и лопастями вращающегося ротора.

Для реализации процесса эксфолиации графита и получения графеновых пластин в непрерывном режиме предложена технологическая схема (рис. 1) [19]. Осуществляется процесс эксфолиации следующим образом. В емкости для исходной суспензии 1 готовят смесь, содержащую жидкость и 10 – 20 масс.% кристаллического графита. Емкость 1 снабжена узлом подачи жидкости из емкости 7 датчиком расхода 6 и дозатором графита 8. Между емкостью 1 и первым роторным аппаратом 2 установлен насос 9 с регулируемой производительностью, посредством которого исходную суспензию подают в блок эксфолиации, состоящий из 5 – 10 роторных аппаратов (на схеме рис. 1 показаны только два аппарата, остальные 3 – 7 аппаратов условно не показаны), соединенных последовательно таким образом, что отверстие для отвода суспензии каждого предыдущего аппарата соединено с отверстием для подачи суспензии каждого последующего аппарата, а отверстие для отвода суспензии из последнего аппарата 3 соединено с патрубком для подачи суспензии в центробежный сепаратор или фильтр 4 через регулируемый клапан 10. Каждый роторный аппарат содержит статор в виде цилиндрической оболочки с отверстиями для подвода и отвода суспензии, ротор с подвижными лопастями и привод вращения ротора. После сепарации фугат подают в емкость готовой графеносодержащей суспензии 5, а осадок – в емкость для исходной суспензии 1.

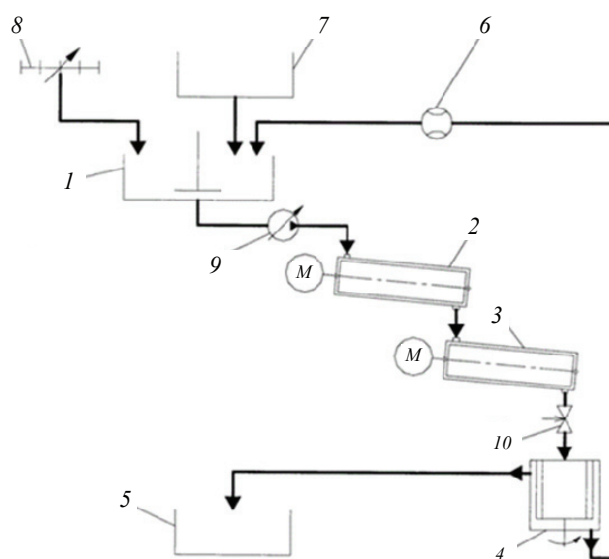


Рис. 1. Схема непрерывного производства графеновых пластин:

1, 5, 7 – емкости исходной суспензии, готовой продукции и исходной жидкости соответственно; 2, 3 – первый и последний роторные аппараты в каскаде соответственно; 4 – центробежный сепаратор; 6 – датчик расхода; 8 – дозатор графитового порошка; 9 – насос; 10 – клапан

На рисунке 2 дана схема роторного аппарата с подвижными лопастями, который состоит из цилиндрического статора 1, ротора 2 с радиальными лопастями, установленного в подшипниковых опорах 3. Ось ротора 2 через муфту 4 соединена с электродвигателем 5. Скорость вращения ротора регулируется в диапазоне 5 000...20 000 об/мин. Роторный аппарат и электродвигатель установлены на основании 6 с помощью кронштейнов 7 – 9. С одной стороны статора 1 установлен патрубок 10 для подачи суспензии, с другой – патрубок 11 для отвода суспензии. Лопасти расположены в радиальных пазах ротора и при его вращении, за счет центробежных сил, они плотно прижимаются к внутренней поверхности статора. На попавшие в зону контакта лопастей со статором частицы графита или многослойного графена действуют сдвигающие силы, в результате чего происходит расслоение частиц, то есть из одной получаются две. После многократного попадания в зону сдвига образуются частицы многослойного и малослойного графенов.

Эффективность предлагаемого способа и устройства для его реализации проверена экспериментально, путем сравнения с прототипом. В качестве прототипа использован смеситель, содержащий статор с внутренним диаметром 42 мм и высотой 60 мм, а также ротор [18]. Зазор между статором и лопастями ротора менее 0,1 мм. На цилиндрической поверхности статора в три ряда, равномерно по высоте расположено 12 отверстий диаметром 5 мм. Предлагаемое устройство имело диаметр 42 мм и длину 180 мм. Необходимо отметить, что в прототипе ротор закреплен консольно, и при увеличении высоты более 60 мм начинаются значительные радиальные биения, при которых ротор касается внутренней поверхности статора и резко увеличивается износ статора и лопастей ротора. В предлагаемом устройстве ротор с двух сторон установлен в подшипниковые опоры, что позволяет увеличивать как диаметр ротора, так и его длину. Скорости вращения ротора в прототипе и предлагаемом устройстве одинаковы 5 000 об/мин.

Последовательность проведения экспериментов. Готовилась водная суспензия кристаллического графита ГС-2 объемом 3 л. Концентрация графита изменялась от 5 до 20 %. Для предотвращения агрегации графеновых структур, образующихся в процессе эксфолиации, в водную суспензию добавляли ПАВ СП-1 из расчета 3 г/л. Устройство-прототип устанавливали в емкость с суспензией и включали привод вращения ротора. Каждые 10 мин выключали привод и отбирали 100 мл суспензии для анализа. Пробу обрабатывали на центрифуге при скорости 500 об/мин в течение 45 мин и удаляли образовавшийся осадок (порядка 10 мл). Осветленную суспензию взвешивали и рассчитывали концентрацию графеновых структур в суспензии. Далее пробу смешивали с осадком и выливали в емкость, после чего продолжали процесс эксфолиации графита.

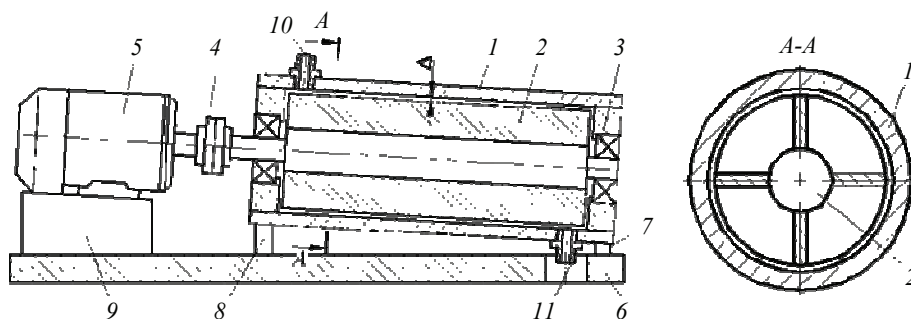


Рис. 2. Схема роторного аппарата:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – подшипниковый узел; 4 – муфта; 5 – электродвигатель; 6 – основание; 7 – 9 – кронштейны; 10, 11 – патрубки подачи исходной и отвода обработанной суспензий соответственно

При использовании предлагаемого способа суспензию обрабатывали в замкнутом цикле, каждые 10 мин отбирали пробы и определяли концентрацию графеновых структур в суспензии. Для реализации обработки суспензии в замкнутом цикле использовали часть установки (см. рис. 1). Обработку суспензии проводили по двум вариантам. В первом варианте использовали емкость исходной суспензии 1, роторные аппараты 2, 3 и насос 9 с фиксированным расходом. Отверстие для отвода суспензии предыдущего аппарата (позиция 1) соединено с отверстием для подачи суспензии последующего аппарата (позиция 2). Отверстие для отвода суспензии из роторного аппарата 2 соединено с емкостью 1 через вентиль 10. Поскольку пробы суспензии подготавливались к анализу с использованием центрифуги, центробежный сепаратор в экспериментах не применяли. Во втором варианте использовали емкость исходной суспензии 1, роторный аппарат 2, насос 9 и вентиль 10. В данном случае суспензия из роторного аппарата 2 поступала в емкость 1, то есть также, как и в первом варианте, обрабатывалась в замкнутом цикле. Поскольку при непрерывном режиме эксфолиации насос подавал суспензию с производительностью 3 л/мин было принято решение обрабатывать 15 л суспензии.

По результатам экспериментов проводили сравнение прототипа и предлагаемого изобретения. На рисунке 3, а, представлены результаты сравнения изменения концентрации графеновых структур от времени обработки для прототипа и предлагаемой конструкции при использовании в качестве жидкости воды. Аналогичные результаты получены при применении в качестве дисперсионной среды масла (рис. 3, б) и отвердителя эпоксидной смолы (рис. 3, в).

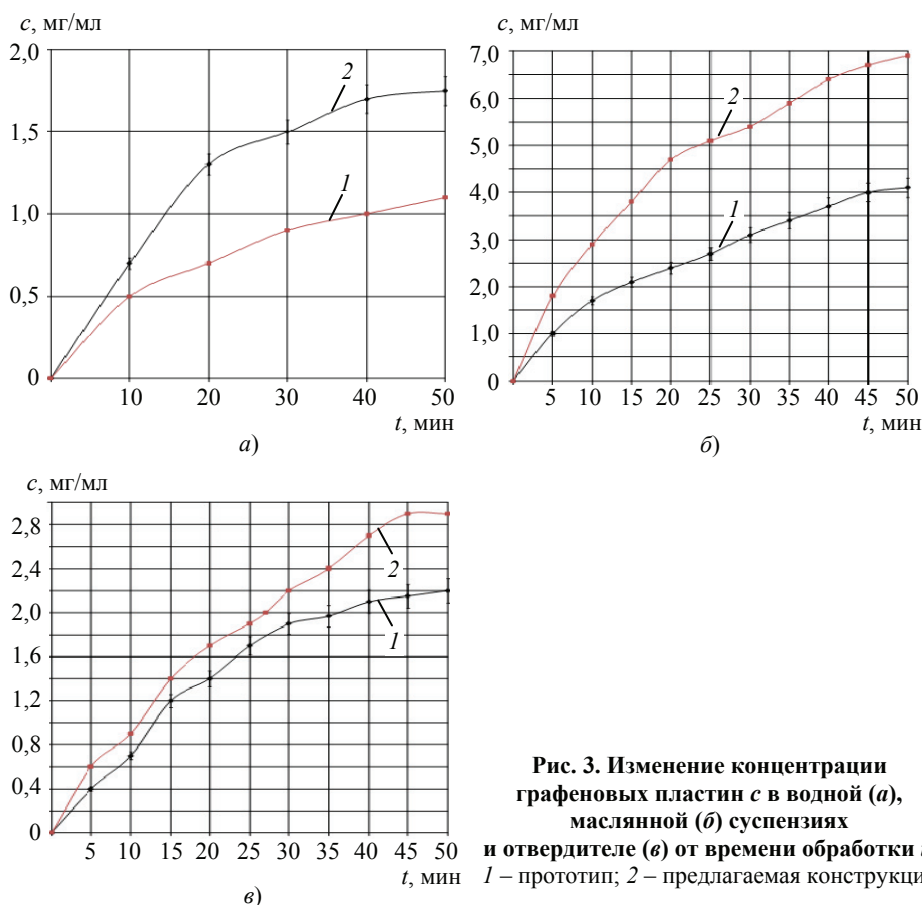


Рис. 3. Изменение концентрации графеновых пластин c в водной (а), масляной (б) суспензиях и отвердителе (в) от времени обработки t : 1 – прототип; 2 – предлагаемая конструкция

Обсуждение результатов

Из графиков видно, что эффективность процесса эксфолиации графита в непрерывном режиме повышается (см. рис. 3). Это объясняется тем, что в непрерывном режиме, на каждом цикле обработки суспензия гарантировано проходит через роторный аппарат, а при периодическом – попадание суспензии в роторный аппарат носит случайный характер. Следует отметить, что при увеличении времени обработки суспензии (в рассматриваемом случае более 50 мин) концентрация графеновых структур, полученных при использовании прототипа, постепенно увеличивалась, а при использовании аппарата, работающего в непрерывном режиме, была практически постоянной. Исходя из этого, можно сделать следующий вывод: при использовании аппарата, работающего в непрерывном режиме, предельная концентрация графеновых структур в суспензии достигается в 1,5 раза быстрее, чем при работающем в периодическом режиме, и ее численное значение больше (минимум на 25 %). В процессе экспериментов также установлено, что при увеличении концентрации графита в исходной суспензии до 15 %, время обработки, за которое достигается предельная концентрация, обратно пропорционально концентрации графита в исходной суспензии, то есть, чем больше концентрация графита в исходной суспензии, тем меньше требуется времени обработки для достижения предельной концентрации. Кроме этого, установлено, что при увеличении объемной производительности насоса, подающего суспензию в аппарат, уменьшается время одного цикла обработки, но большее число циклов требуется для достижения предельной концентрации. В конечном итоге, при прочих равных условиях, время обработки, за которое достигается предельная концентрация, остается постоянным. Установленные выше закономерности позволяют сделать вывод о том, что интенсивность процесса эксфолиации в непрерывном режиме, в основном, зависит от длины пути частиц графита в зоне контакта между статором и лопастями вращающегося ротора в единицу времени.

Выводы и перспективы

Разработаны способ и устройство для получения графеносодержащих суспензий жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита в непрерывном режиме. Установлено, что интенсивность процесса эксфолиации в непрерывном режиме выше, чем в периодическом. На основании анализа результатов экспериментальных исследований сделано следующее предположение: интенсивность процесса эксфолиации в непрерывном режиме в основном зависит от длины пути частиц графита в зоне контакта между статором и лопастями вращающегося ротора в единицу времени. Для подтверждения данного предположения необходимо найти экспериментальную зависимость интенсивности процесса эксфолиации от указанной длины пути при разных сочетаниях режимных и геометрических параметров.

Список литературы

1. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov [et al.] // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666 – 669.
2. The Electronic Properties of Graphene / A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres [et al.] // Reviews of Modern Physics. – 2009. – Vol. 81. – P. 109 – 162. doi: 10.1103/RevModPhys.81.109
3. Geim, A. K. The Rise of Graphene / A. K. Geim, K. S. Novoselov // Nature Materials. – 2007. – Vol. 6. – P. 183 – 191. doi:10.1038/nmat1849

4. Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov [et al.] // *Nature*. – 2005. – Vol. 438. – P. 197 – 200. doi:10.1038/nature04233
5. New Generation of Massless Dirac Fermions in Graphene under External Periodic Potentials / C.-H. Park, L. Yang, Y.-W. Son [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2008. – Vol. 101. – P. 126804. doi:10.1103/PhysRevLett.101.126804
6. Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer / S. V. Morozov, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2008. – Vol. 100. – P. 016602. doi:10.1103/PhysRevLett.100.016602
7. Shishir, R. S. Intrinsic Mobility in Graphene / R. S. Shishir, D. K. Ferry // *Journal of Physics Condensed Matter*. – 2009. – Vol. 21. – P. 232204. doi:10.1088/0953-8984/21/23/232204
8. Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene / K. S. Novoselov, Z. Jiang, Y. Zhang [et al.] // *Science*. – 2007. – Vol. 315. – P. 1379.
9. Gusynin, V. P. Unconventional Integer Quantum Hall Effect in Graphene / V. P. Gusynin, S. G. Sharapov // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 95. – P. 146801. doi:10.1103/PhysRevLett.95.146801
10. Katsnelson, M. I. Chiral Tunnelling and the Klein Paradox in Graphene / M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, A. K. Geim // *Nature Physics*. – 2006. – Vol. 2. – P. 620 – 625. doi:10.1038/nphys384
11. The Structure of Suspended Graphene Sheets / J. C. Meyer, A. K. Geim, M. I. Katsnelson [et al.] // *Nature*. – 2007. – Vol. 446. – P. 60 – 63. doi:10.1038/nature05545
12. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene / A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao [et al.] // *Nano Letters*. – Vol. 8. – P. 902 – 907. doi:10.1021/nl0731872
13. Direct Exfoliation and Dispersion of Two-Dimensional Materials in Pure Water Via Temperature Control / J. Kim, S. Kwon, D.-H. Cho [et al.] // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 8294 – 8304. doi:10.1038/ncomms9294
14. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications / D. Dimov, I. Amit, O. Gorrie [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Vol. 28. – P. 1705183 (1 – 12). doi:10.1002/adfm.201705183
15. Аль-Шиблави, К. А. Х. Модифицирование цемента малослойным графеном / К. А. Х. Аль-Шиблави, В. Ф. Першин, Т. В. Пасько // *Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та*. – 2018. – № 4 (46). – С. 6 – 11. doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-6-11
16. Fabrication of Two-Dimensional Nanosheets Via Water Freezing Expansion Exfoliation / C. Li, T. Wang, Y. Wu [et al.] // *Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 25. – P. 495302 – 495308. doi:10.1088/0957-4484/25/49/495302
17. Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids / K. R. Paton, E. Varrla, C. Backes [et al.] // *Nature Materials*. – 2014. – Vol. 13. – P. 624 – 630. doi:10.1038/nmat3944
18. Пат. 2737925 Российская Федерация, МПК C01B 32/186, B82Y 40/00. Способ получения графеносодержащих суспензий эксфолиацией графита и устройство для его реализации / В. Ф. Першин, Р. А. Аль-Джахар, В. Мансур, А. А. Баранов, А. М. Воробьев, Д. Д. Мелехин, Н. Р. Меметов, А. А. Осипов, А. А. Пасько, А. Г. Ткачев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2019141021 ; заявл. 12.12.2019 ; опубл. 04.12.2020, Бюл. № 34. – 14 с.
19. Пат. 2720684 Российская Федерация, МПК C01B 32/186, B82Y 40/00, B02C 19/20. Способ получения графеносодержащих суспензий и устройство для его реализации / В. Ф. Першин, К. А. Х. Аль-Шиблави, А. М. Р. Аль-Машхадани,

В. Н. Артемов, А. М. Воробьев, А. А. Киселев, Д. Д. Мелехин, Н. Р. Меметов, А. А. Осипов, А. А. Пасько, А. Г. Ткачев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2019101764 ; заявл. 13.03.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 14. – 13 с.

Production of Graphene-Containing Suspensions for Liquid-Phase Shear Exfoliation of Graphite

R. A. Al-Jarakh¹, V. F. Pershin¹, A. A. Osipov²

*Department of Equipment and Technology of Nanoproduction,
pershin.home@mail.ru; TSTU (1);
JSC "ZAVKOM" (2), Tambov, Russia*

Keywords: graphite; low-layer graphene; multilayer graphene; shear exfoliation; suspension.

Abstract: A method and device for obtaining graphene-containing suspensions by liquid-phase shear exfoliation of graphite in a continuous mode have been developed. The comparison of the intensities of the process of exfoliation of graphite in the periodic and continuous modes was carried out and it was found that the intensity of the exfoliation process in the continuous mode is higher than in the periodic one. The limiting concentration of graphene structures in a suspension is reached 1.5 times faster when using an apparatus operating in a continuous mode than in a periodic mode, and its numerical value is greater (by at least 25 %).

References

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. [et al.] Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 2004, vol. 306, pp. 666-669.
2. Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. The Electronic Properties of Graphene, *Reviews of Modern Physics*, 2009, vol. 81, pp. 109-162, doi: 10.1103/RevModPhys.81.109
3. Geim A.K., Novoselov K.S. The Rise of Graphene, *Nature Materials*, 2007, vol. 6, pp. 183-191, doi:10.1038/nmat1849
4. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. [et al.] Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene, *Nature*, 2005, vol. 438, pp. 197-200, doi:10.1038/nature04233
5. Park C.-H., Yang L., Son Y.-W., Cohen M.L., Louie S.G. New Generation of Massless Dirac Fermions in Graphene under External Periodic Potentials, *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101, p. 126804, doi:10.1103/PhysRevLett.101.126804
6. Morozov S.V., Novoselov K.S., Katsnelson M.I. [et al.] Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer, *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, p. 016602, doi:10.1103/PhysRevLett.100.016602
7. Shishir R.S., Ferry D.K. Intrinsic Mobility in Graphene, *Journal of Physics Condensed Matter*, 2009, vol. 21, p. 232204, doi:10.1088/0953-8984/21/23/232204
8. Novoselov K.S., Jiang Z., Zhang Y. [et al.] Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene, *Science*, 2007, vol. 315, p. 1379.
9. Gusynin V.P., Sharapov S.G. Unconventional Integer Quantum Hall Effect in Graphene, *Physical Review Letters*, 2005, vol. 95, p. 146801, doi:10.1103/PhysRevLett.95.146801

10. Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Geim A.K. Chiral Tunnelling and the Klein Paradox in Graphene, *Nature Physics*, 2006, vol. 2, pp. 620-625, doi:10.1038/nphys384
11. Meyer J.C., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Booth T.J., Roth S. The Structure of Suspended Graphene Sheets, *Nature*, 2007, vol. 446, pp. 60-63, doi:10.1038/nature05545
12. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters*, vol. 8, pp. 902-907, doi:10.1021/nl0731872
13. Kim J., Kwon S., Cho D.-H. [et al.] Direct Exfoliation and Dispersion of Two-Dimensional Materials in Pure Water Via Temperature Control, *Nature Communications*, 2015, vol. 6, pp. 8294-8304, doi:10.1038/ncomms9294
14. Dimov D., Amit I., Gorrie O. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications, *Advanced Functional Materials*, 2018, vol. 28, p. 1705183 (1 - 12), doi:10.1002/adfm.201705183
15. Al'-Shiblavi K.A.Kh., Pershin V.F., Pas'ko T.V. [Modification of cement with a low-layer graphene], *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Science Vector of Togliatti State University], 2018, no. 4 (46), pp. 6-11, doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-6-11 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Li C., Wang T., Wu Y. [et al.] Fabrication of Two-Dimensional Nanosheets Via Water Freezing Expansion Exfoliation, *Nanotechnology*, 2014, vol. 25, pp. 495302-495308, doi:10.1088/0957-4484/25/49/495302
17. Paton K.R., Varrla E., Backes C. [et al.] Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids, *Nature Materials*, 2014, vol. 13, pp. 624-630, doi:10.1038/nmat3944
18. Pershin V.F., Al'-Dzhakhar R.A., Mansur V., Baranov A.A., Vorob'yev A.M., Melekhin D.D., Memetov N.R., Osipov A.A., Pas'ko A.A., Tkachev A.G. *Sposob polucheniya grafenosoderzhashchikh suspenziy eksfoliatsiyey grafita i ustroystvo dlya yego realizatsii* [Method of obtaining graphene-containing suspensions by exfoliation of graphite and a device for its implementation], Russian Federation, 2020, Pat. 2737925. (In Russ.)
19. Pershin V.F., Al'-Shiblavi K.A.Kh., Al'-Mashkhadani A.M.R., Artemov V.N., Vorob'yev A.M., Kiselev A.A., Melekhin D.D., Memetov N.R., Osipov A.A., Pas'ko A.A., Tkachev A.G. *Sposob polucheniya grafenosoderzhashchikh suspenziy i ustroystvo dlya yego realizatsii* [Method for preparing graphene-containing suspensions and device for its implementation], Russian Federation, 2020, Pat. 2720684. (In Russ.)

Herstellung von graphithaltigen Suspensionen durch Flüssigphasen-Scher-Exfoliation von Graphit

Zusammenfassung: Es sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung von graphithaltigen Suspensionen durch Flüssigphasen-Scher-Exfoliation von Graphit im Dauerbetrieb entwickelt. Es ist ein Vergleich der Intensitäten des Exfoliationsprozesses von Graphit im periodischen und kontinuierlichen Modus durchgeführt. Es ist festgestellt, dass die Intensität des Exfoliationsprozesses im kontinuierlichen Modus höher als im periodischen ist. Die Grenzkonzentration von Graphenstrukturen in einer Suspension wird bei der Verwendung einer kontinuierlich betriebenen Vorrichtung 1,5-mal schneller erreicht als in periodischem Modus, und sein numerischer Wert ist größer (mindestens um 25 %).

Production de suspensions contenant du graphène d'exfoliation de phase liquide de décalage du graphite

Résumé: Sont mis au point un procédé et un dispositif pour produire des suspensions de graphène par exfoliation de phase liquide de décalage du graphite en mode continu. Sont comparées les intensités du processus d'exfoliation du graphite en mode périodique et en mode continu; est constaté que l'intensité du processus d'exfoliation en mode continu est plus élevée qu'en mode périodique. La concentration limitée des structures de graphène dans la suspension est atteinte 1,5 fois plus vite avec l'utilisation d'un appareil fonctionnant en régime continu par comparaison avec celui périodique, sa valeur numérique est supérieure (minimum de 25 %).

Авторы: *Аль-Джарах Руаа Амер* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Осинов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент, начальник цеха полифункциональных углеродных наноматериалов и суперконцентратов на их основе, АО «ЗАВКОМ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФЕРРОМАГНИТНУЮ ЧАСТИЦУ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТОТЕРМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Н. В. Воронин¹, Ю. В. Родионов¹, Д. В. Никитин¹, И. С. Филатов²

*Кафедра «Механика и инженерная графика» (1),
rodionow.u.w@rambler.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ»;
ТОГБПОУ «Приборостроительный колледж» (2), г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: магнитное поле; поверхностное армирование; расчет сил; теплообмен; ферромагнитные частицы.

Аннотация: Рассмотрены силы, действующие на ферромагнитную частицу со стороны магнитного и теплового полей, а также силы, противодействующие ее внедрению со стороны поверхностного слоя полимера. Проведен расчет сил, действующих на ферромагнитную частицу в процессе ее внедрения в поверхностный слой полимера на примере никеля и полипропилена. Рассчитан баланс сил, необходимый для внедрения частицы ферромагнетика в расплавленную поверхность термопластичного полимера и устойчивой фиксации в ней. Показана универсальность применяемого подхода для расчета параметров модифицирования поверхности изделий из термопластов с различными свойствами ферромагнитными частицами разной дисперсности и характеристик.

Введение

Все большее применение в узлах и деталях машин и аппаратов химической промышленности и сельскохозяйственных машин находят изделия из термопластичных полимеров [1 – 3]. Они высокотехнологичны, дешевы в производстве и переработке, но обладают низкой поверхностной твердостью и износостойкостью, что ограничивает сферу их использования.

Существенно повысить износостойкость и поверхностную твердость полимерных деталей представляется возможным, внедрив в поверхностный слой термопластов металлические частицы. Надежная фиксация внедряемых частиц возможна в случае использования ультрадисперсных ферромагнетиков, воздействуя на них магнитным полем высокой интенсивности в направлении их внедрения в поверхностный слой термопласта.

Для правильного расчета параметров воздействия магнитного поля различной напряженности на частицы, имеющие различные размеры и физические свойства, необходимо досконально знать силы, действующие на них как со стороны магнитного поля, так и со стороны расплавленного поверхностного слоя полимера. При этом важно учитывать изменение напряженности магнитного поля при модифицировании полимерных изделий различной толщины, воздействие теплового потока на процесс внедрения частицы, удельную теплоемкость и теплопроводность полимера и внедряемой частицы, а также противодействующие внедре-

нию частицы поверхностные силы, такие, как сила поверхностного натяжения, Архимедова сила, сила вязкого трения и сила сопротивления среды.

Учитывая все составляющие процесса армирования поверхности термопласта, необходимо вывести соотношение сил, гарантированно обеспечивающих проникновение частицы в модифицируемую поверхность термопласта и надежное удержание в ней [1 – 3].

Цель статьи – определение и расчет сил, действующих на ферромагнитную частицу при внедрении ее в поверхностный слой полимера. Рассмотрены как силы, способствующие проникновению частицы в поверхность (сила тяжести $F_{\text{тяж}}$, сила давления воздушного потока $F_{\text{дав}}$, магнитная сила захвата $F_{\text{магн}}$), так и противодействующие ее проникновению силы (сила вязкого трения $F_{\text{в. тр}}$, сила Архимеда $F_{\text{А}}$, сила поверхностного натяжения $F_{\text{п. н}}$, сила сопротивления среды $F_{\text{сопр}}$) со стороны поверхностного слоя термопласта и показано соотношение сил для гарантированного прохода частиц ферромагнетика на необходимую глубину и устойчивую фиксацию данных частиц в поверхностном слое.

Методика исследования

Задача расчета состоит в описании действующих на частицы ферромагнитного материала сил и демонстрации принципиальной возможности внедрения ультрадисперсных ферромагнитных частиц в поверхностный слой изделий из термопластичных полимеров при одновременном действии теплового и магнитного полей. Главным критерием внедрения частицы является значительное преобладание сил, действующих на частицу извне, над силами сопротивления внедрению со стороны поверхностного слоя полимера.

Нагрев поверхности и формирование расплавленного поверхностного слоя осуществляются в течение короткого периода времени (порядка нескольких секунд). Вследствие малых размеров частицы и ее высокой (по отношению к полимеру) теплопроводности формирование расплавленного слоя происходит в большей степени за счет нагрева самой частицы. Сам поверхностный слой, в который внедряются частицы, представляет собой высоковязкую ньютоновскую несжимаемую жидкость (так как течения жидкости как такового в данном случае нет). Вращение частицы в поверхностном слое практически отсутствует, так как его компенсируют сила вязкого трения и сила сопротивления среды. В данном случае, вне зависимости от формы частицы, под действием магнитного поля частица примет такое положение, чтобы коэффициент сопротивления среды был минимальным [4 – 8].

Слой состоит из внедренных ферромагнитных частиц и полимерной матрицы в расплавляемую в процессе армирования приповерхностную область. При этом площадь, занимаемая внедренными частицами ферромагнетика, составляет от 50 % и выше, что сообщает поверхностному слою высокую износостойкость и поверхностную твердость по сравнению с исходным полимером. Объемные характеристики армированной детали (температуростойкость, ударная вязкость, пределы прочности/текучести и т.д.) не изменятся. Расстояние между внедренными частицами не менее половины диаметра внедряемой частицы.

Начальными, промежуточными и конечными условиями (рис. 1) в данном случае являются два момента соответственно:

1) Ферромагнитные частицы на поверхности полимера уже захвачены магнитным полем, но передача тепла от нагретого воздушного потока к поверхностному слою полимера и частице отсутствует (то есть не начато формирование необходимого расплавленного/размягченного поверхностного слоя);

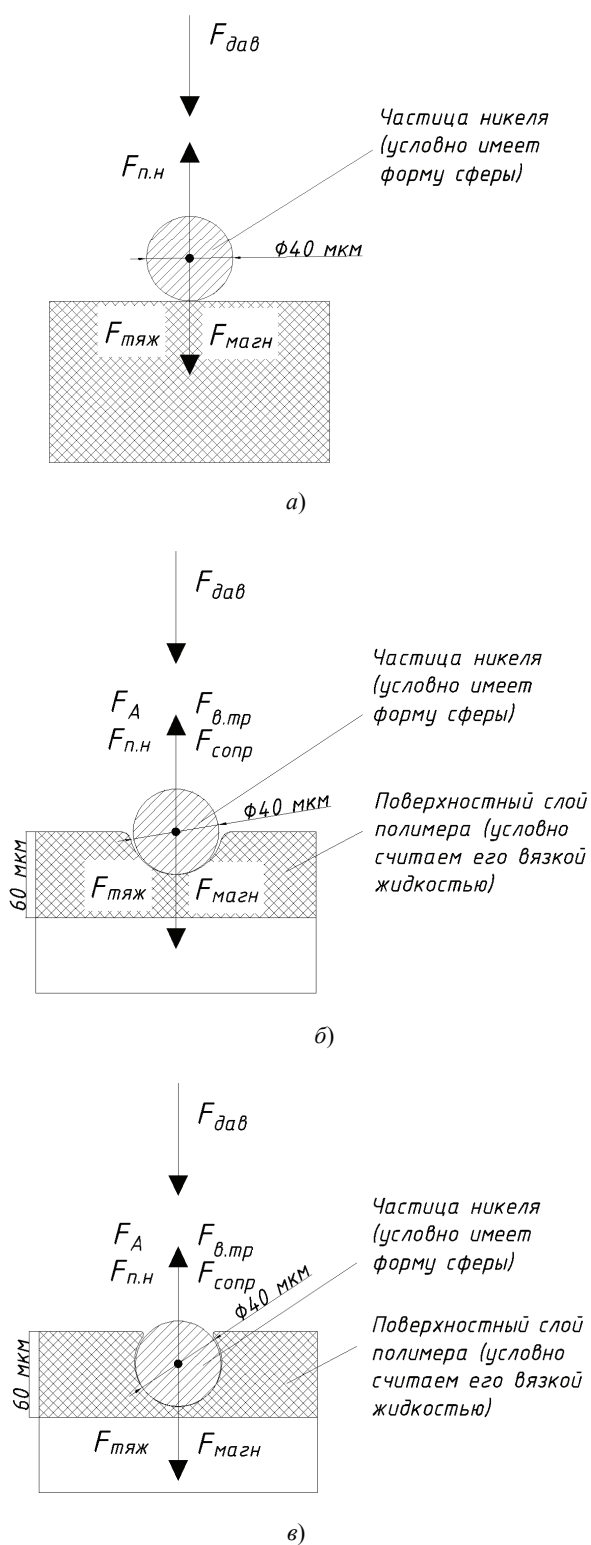


Рис. 1. Схема расположения ферромагнитной частицы на поверхности полимера в начальной (а), промежуточной (б) и конечной (в) стадиях процесса ее внедрения

2) Передача тепла от нагретого воздушного потока к поверхностному слою полимера и частице присутствует, частица прошла необходимое расстояние и закрепились в поверхностном слое полимера (не менее 75 % от диаметра частицы для надежного ее удержания на поверхности);

Дополнительными условиями являются допущения о формировании нагретой ферромагнитной частицей локального объема расплавленного полимера и движение данной частицы в нем с одновременным распространением жидкофазного состояния по более глубоким слоям термопласта. Поверхностный слой полимера находится в жидком состоянии и имеет следующие характеристики: показатель текучести расплава (ПТР) – 0,29...0,35 г/мин, индекс расплава – 0,02...0,5 г/мин, средняя динамическая вязкость – $2 \cdot 10^4$ Па·с [4 – 8].

Результаты и их обсуждение

Определим и рассчитаем силы, действующие на ферромагнитную частицу как извне, так и со стороны расплавленного поверхностного слоя полимера, считая его жидкой средой с толщиной 60 мкм (см. рис. 1).

Формула расчета магнитной силы захвата [9 – 12], действующей на ферро-частицу

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 V_{\text{ч}} \chi_{\text{уд}} H \text{grad} H = \frac{\chi_{\text{уд}} V_{\text{ч}} B \text{grad} B}{\mu_0}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $V_{\text{ч}}$ – объем частицы, м^3 ; $\chi_{\text{уд}}$ – удельная магнитная восприимчивость никеля, $\text{м}^3/\text{кг}$; H – напряженность намагничивающего поля, А/м; B – индукция магнитного поля, Тл; $\text{grad} H / \text{grad} B$ – градиент напряженности поля / индукции поля.

Для упрощения расчета составляющих сил используем градиент индукции магнитного поля (рис. 2).

Самый важный в данном случае участок графика – от 0 до 0,5 см, на котором падение значения индукции магнитного поля считаем приближенно линейной зависимостью. В общем же виде экспоненциальная зависимость, полученная с помощью метода наименьших квадратов, имеет вид

$$y = 0,066e^{-136x}. \quad (2)$$

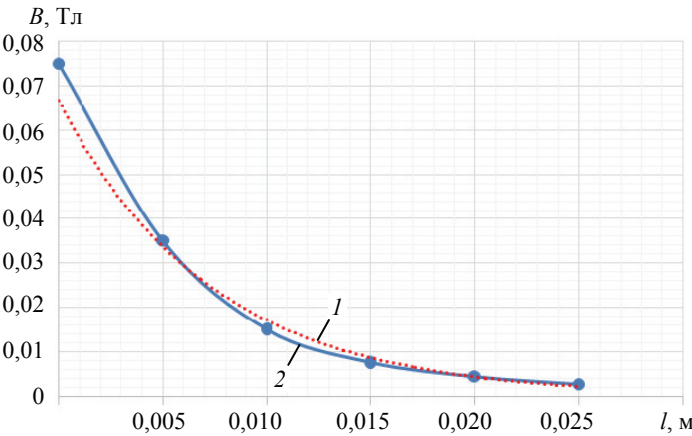


Рис. 2. Зависимость величины магнитной индукции от расстояния до сердечника электромагнита:
1, 2 – аппроксимированные и экспериментальные данные соответственно

Общее определение градиента гласит, что он численно (по модулю) равен скорости роста величины в указанном направлении. На данном участке скорость изменения индукции магнитного поля можно найти, используя следующее соотношение:

$$v_{\text{изм. } B} = \frac{B_0 - B_l}{l}, \quad (3)$$

где B_0 , B_l – значения магнитной индукции на поверхности торца и на расстоянии l , м, от торца сердечника электромагнита, Тл.

Так как зависимость на указанном выше участке считаем приближенно линейной, то, согласно формуле (3) и взяв две крайние точки данного участка, скорость изменения магнитной индукции составит

$$v_{\text{изм. } B} = \frac{0,075 - 0,035}{0,005} = 8 \text{ Тл/м.}$$

Прежде чем рассчитать магнитную силу захвата, необходимо найти значения некоторых базовых параметров частицы, а именно объем, массу и удельную магнитную восприимчивость. Для этого допускаем, что частица никеля имеет форму сферы.

Объем частицы [9 – 12] найдем по формуле:

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (4)$$

где d – диаметр частицы, м;

$$V_{\text{ч}} = \frac{3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-5})^3}{6} \approx 3,35 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3.$$

С учетом того, что в экспериментах использовался порошок никеля, плотность которого составляет 8900 кг/м^3 , массу частицы $m_{\text{ч}}$ найдем по формуле

$$m_{\text{ч}} = \rho_{\text{Ni}} V_{\text{ч}}, \quad (5)$$

где ρ_{Ni} – плотность никеля, кг/м^3 .

Тогда искомое значение массы частицы составит

$$m_{\text{ч}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,9815 \cdot 10^{-10} \text{ кг.}$$

Удельная магнитная восприимчивость $\chi_{\text{уд}}$ может быть рассчитана по формуле [9 – 12]

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{\chi}{\rho}, \quad (6)$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества; ρ – плотность вещества, кг/м^3 .

В свою очередь магнитная восприимчивость вещества χ может быть рассчитана по формуле [1, 2]

$$\chi = \frac{J}{H}, \quad (7)$$

где J – намагниченность вещества, А/м.

Для расчета возьмем справочное значение намагниченности насыщения никеля $J_s = 6,084 \cdot 10^{11} \text{ А/м.}$

Намагниченность вещества J может быть рассчитана по формуле [1, 2]

$$J = \frac{M_q}{V_q}, \quad (8)$$

где M_q – магнитный момент частицы никеля, $A \cdot m^2$.

Отсюда

$$M_q = JV_q. \quad (9)$$

Таким образом, магнитный момент M_q с учетом допущений составит

$$M_q = 6,084 \cdot 10^{11} \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,038 \cdot 10^{-2} A \cdot m^2.$$

С учетом последовательного преобразования формул (7) – (9), имеем

$$\chi_{уд} = \frac{M_q}{V_q H \rho_{Ni}}. \quad (10)$$

Во время экспериментов полученное значение напряженности магнитного поля составило $4,2 \cdot 10^4$ А/м. Принимая во внимание данное значение, удельная магнитная восприимчивость частицы никеля составит

$$\chi_{уд} = \frac{2,038 \cdot 10^{-2}}{3,35 \cdot 10^{-14} \cdot 4,2 \cdot 10^4 \cdot 8,9 \cdot 10^3} = 1,252 \cdot 10^3 = 1252.$$

Рассчитаем $F_{\text{магн}}$ по формуле (1) [9 – 12]

$$F_{\text{магн}} = \frac{1,252 \cdot 10^3 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} \cdot 7,5 \cdot 10^{-2} \cdot 8}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ Н}.$$

Полученное значение магнитной силы подтверждает верность формулы расчета и коррелирует с ранее высказанным утверждением о преобладании магнитной силы над силой тяжести.

В непосредственной близости от электромагнита (расстояние не более 2 мм) магнитная сила, действующая на ферромагнитные частицы, не может быть меньше силы тяжести вне зависимости от направления действия сил. В противном случае удержание частиц на поверхности было бы затруднительным вследствие их смещения потоками воздуха с небольшими скоростями (в среднем 7,5 м/с), а само использование нагретого теплового потока было бы невозможным из-за полного сноса им внедряемых частиц с их необходимого месторасположения. Средняя скорость погружения феррочастицы в таком случае составила 20 мкм/мин, время погружения – от одной до полутора минут. Более длительный нагрев, согласно экспериментам, приводит к полной деструкции полимера по объему.

Для расчета не связанных с магнитным полем сил примем допущение, согласно которому поверхностный слой полимера будем считать покоящейся высоковязкой ньютоновской жидкостью. Также для расчета возьмем следующие значения некоторых необходимых величин:

- скорость движения частицы $v_q = 20$ мкм/мин или $0,33 \cdot 10^{-6}$ м/с;
- динамическая вязкость расплавленного полипропилена $\mu_{p. \text{пп}} = 2 \cdot 10^4$ Па·с;
- коэффициент сопротивления воздуха для шара $c = 0,3$;
- плотность воздуха $\rho_{\text{возд}} = 1,225$ кг/м³;
- коэффициент поверхностного натяжения расплава полипропилена $\sigma_{p. \text{пп}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Н/м;

- глубина внедрения частицы $l_{\text{вн}} = 30$ мкм или $3 \cdot 10^{-5}$ м;
- плотность расплава полипропилена $\rho_{\text{р. пп}} = 910$ кг/м³;
- скорость потока воздуха $v_{\text{возд}} = 7,5$ м/с согласно экспериментальным данным;
- площадь поперечного сечения частицы $S_{\text{п. с. ч}} = 12,56 \cdot 10^{-10}$ м².

Силу тяжести, действующую на ферромагнитную частицу, найдем по формуле [1, 2]:

$$F_{\text{тяж}} = m_{\text{ч}} g; \quad (11)$$

$$F_{\text{тяж}} = 2,9815 \cdot 10^{-10} \cdot 9,81 = 2,925 \cdot 10^{-9} \text{ Н.}$$

Сила Архимеда, действующая на ферромагнитную частицу, также рассчитывается по известной формуле [9 – 12]:

$$F_A = \rho_{\text{р. пп}} g V_{\text{ч}}; \quad (12)$$

$$F_A = 9,1 \cdot 10^2 \cdot 9,81 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,99 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

Сила давления потока воздуха на частицу вычисляется по формуле:

$$F_{\text{дав}} = c S_{\text{п. с. ч}} \rho_{\text{возд}} \frac{v_{\text{возд}}^2}{2}; \quad (13)$$

$$F_{\text{дав}} = 0,3 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} \cdot 1,225 \cdot \frac{(7,5)^3}{2} = 1,947 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Сила трения в покоящейся вязкой жидкости рассчитывается по закону Стокса [3 – 6]:

$$|F_{\text{в. тр}}| = | - 6\pi r_{\text{ч}} \mu_{\text{р. пп}} v_{\text{ч}} |, \quad (14)$$

где $r_{\text{ч}}$ – радиус частицы, м;

$$|F_{\text{в. тр}}| = | - 6 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6} | = 2,487 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Силу поверхностного натяжения расплавленного полимера с учетом допущений рассчитаем по формуле [9 – 12]:

$$F_{\text{п. н.}} = \sigma_{\text{р. пп}} l_{\text{вн}}; \quad (15)$$

$$F_{\text{п. н.}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Сила сопротивления среды [9 – 12] зависит от плотности среды, площади поперечного сечения тела движущегося тела и квадрата его скорости

$$F_{\text{сопр}} = \rho_{\text{р. пп}} S_{\text{п. с. ч}} v_{\text{ч}}^2 = \beta v_{\text{ч}}^2, \quad (16)$$

где $\beta = \rho S$ – коэффициент сопротивления среды.

Согласно формуле, эта сила в усредненном значении будет равна

$$F_{\text{сопр}} = 9,1 \cdot 10^2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} \cdot (0,33 \cdot 10^{-6})^2 = 12,45 \cdot 10^{-20} \text{ Н.}$$

Полученные расчеты показывают соотношение основных сил, действующих на внедряемую в поверхность термопласта ферромагнитную частицу, и подтверждают значительное преобладание внедряющих сил над противодействующими силами находящейся в состоянии расплава поверхности термопластичного полимера. Это гарантирует надежную фиксацию ультрадисперсного ферромагнетика в поверхностном слое термопласта и сообщение последнему поверхностной твердости и износостойкости, сопоставимой с данными параметрами у внедряемых частиц металла или металлического сплава, что обеспечит долговую и бесперебойную работу узлов машин и механизмов с деталями из термопластичных полимеров.

Заключение

Показанные расчеты сил на примере внедряемых в поверхность полипропилена частиц никеля дают возможность определить параметры воздействия на частицы ферромагнетиков различного размера и магнитных свойств для их гарантированного внедрения в поверхностные слои термопластов с различными физико-механическими свойствами. Универсальность расчетов позволяет вывести аналитическое уравнение движения ферромагнитной частицы в расплавленном поверхностном слое термопластичного полимера с последующим созданием на его основе математической модели армирования поверхностного слоя изделий из термопластов. Данные расчеты позволяют создать универсальную установку для экспериментального и промышленного проведения поверхностного армирования полимерных изделий.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Разработка метода магнитнотермического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения», конкурс «Аспиранты», 2020 г. № договора 20-33-90298/20.

Список литературы

1. Rodionov, Yu. V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology / Yu. V. Rodionov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3Б. – С. 779 – 784.
2. Родионов, Ю. В. Исследование магнитотермического поверхностного армирования полимерных материалов / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, Н. В. Воронин, И. С. Филатов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 7-2021. – С. 37 – 39.
3. Теоретические исследования контактных и изгибных напряжений лопаток рабочего колеса и корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса из полимеров / Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, А. И. Скоморохова [и др.] // Наука в центральной России. – 2020. – № 3 (45). – С. 85 – 97. doi: 10.35887/2305-2538-2020-3-85-97
4. Ван Кревелен, Д. В. Свойства и химическое строение полимеров / Д. В. Ван Кревелен ; пер. с англ. Ф. Ф. Ходжеванова ; под ред. А. Я. Малкина. – М. : Химия, 1976. – 416 с.
5. Кикоин, А. К. Молекулярная физика : учеб. пособие / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин. – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 480 с.
6. Энциклопедия полимеров. Т. 3 Полиоксадиазолы – Я / Под ред. В. А. Кабанова. – М. : Сов. энциклопедия, 1977. – 1152 с.
7. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров : учеб. пособие / А. А. Тагер ; под ред. А. А. Аскадского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Научный мир, 2007. – 573 с.

8. Переработка полимеров и композитов в твердой фазе : учеб. пособие / Г. С. Баронин, А. М. Столин, М. Л. Кербер, В. М. Дмитриев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 140 с.

9. Евдокимов, А. А. Теоретическое обоснование критерия эффективности извлечения ферромагнитных частиц из потока жидкости в электромагнитном сепараторе УМС-4М / А. А. Евдокимов, В. И. Чарыков // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. – 2013. – № 9 (107). – С. 106 – 110.

10. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. Л. Детлаф, А. К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М. : ООО «Изд-во Оникс» ; ООО «Изд-во «Мир и Образование», 2006. – 1056 с.

11. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие. В 10 томах. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., стереотипное. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.

12. Орир, Дж. Физика. Полный курс: примеры, задачи, решения / Дж. Орир : пер. с англ. Ю. Г. Рудой, А. В. Берков. – М. : Книжный дом Университет, 2019. – 752 с.

Determining Impact Forces on a Ferromagnetic Particle in the Process of Magnetothermal Surface Reinforcement of Products from Thermoplastic Polymers

N. V. Voronin¹, Yu. V. Rodionov¹, D. V. Nikitin¹, I. S. Filatov²

*Department of Mechanics and Engineering Graphics (1),
rodionow.u.w@rambler.ru; TSTU;
“Instrument-Making College” (2), Tambov, Russia*

Keywords: magnetic field; surface reinforcement; calculation of forces; heat exchange; ferromagnetic particles.

Abstract: The author considers the forces acting on a ferromagnetic particle from the side of the magnetic and thermal fields, as well as the forces opposing its penetration from the side of the surface layer of the polymer. The calculation of the forces acting on a ferromagnetic particle in the process of its introduction into the surface layer of the polymer is carried out using the example of nickel and polypropylene. The balance of forces required for the introduction of a ferromagnetic particle into the molten surface of a thermoplastic polymer and stable fixation in it is calculated. The universality of the approach used is shown for calculating the parameters of surface modification of thermoplastic products with different properties by ferromagnetic particles of different dispersion and characteristics.

References

1. Rodionov Yu.V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 3Б, pp. 779-784. (In Eng., abstract in Russ.)

2. Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Voronin N.V., Filatov I.S. [Research of magnetothermal surface reinforcement of polymer materials], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2021, no. 7-2021, pp. 37-39. (In Russ.)

3. Voronin N.V., Rodionov Yu.V., Skomorokhova A.I., Nikitin D.V., Galkin P.A., Filatov I.S. [Theoretical studies of contact and bending stresses of the impeller blades and the casing of a liquid ring vacuum pump made of polymers], *Nauka v tsestral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2020, no. 3 (45), pp. 85-97, doi: 10.35887/2305-2538-2020-3-85-97 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Van Krevelen D.W. *Properties of Polymers Correlations with Chemical Structure*, London; New York, 1972.
5. Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekulyarnaya fizika: uchebnoye posobiye* [Molecular physics: a tutorial], St. Petersburg: Lan', 2008, 480 p. (In Russ.)
6. Kabanov V.A. [Ed.] *Entsiklopediya polimerov. T. 3 Polioksadiazoly – Ya* [Encyclopedia of Polymers. Vol. 3 Polyoxadiazoles - I], Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1977, 1152 p. (In Russ.)
7. Tager A.A., Askadsky A.A. [Ed.] *Fiziko-khimiya polimerov: uchebnoye posobiye* [Physical chemistry of polymers: a tutorial], Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 573 p. (In Russ.)
8. Baronin G.S., Stolin A.M., Kerber M.L., Dmitriyev V.M. *Pererabotka polimerov i kompozitov v tverdoy faze: uchebnoye posobiye* [Processing of polymers and composites in the solid phase: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 140 p. (In Russ.)
9. Yevdokimov A.A., Charykov V.I. [Theoretical substantiation of the criterion for the efficiency of extracting ferromagnetic particles from a liquid flow in an electromagnetic separator UMS-4M], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2013, no. 9 (107), pp. 106-110. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Yavorskiy B.M., Detlaf A.L., Lebedev A.K. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [Handbook of physics for engineers and university students], Moscow: OOO "Izdatel'stvo Oniks"; OOO "Izdatel'stvo "Mir i Obrazovaniye", 2006, 1056 p. (In Russ.)
11. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika: uchebnoye posobiye. V 10 tomakh. T. VIII. Elektrodinamika sploshnykh sred* [Theoretical physics: a tutorial. In 10 volumes. Vol. VIII. Electrodynamics of continuous media], Moscow: FIZMATLIT, 2005, 656 p. (In Russ.)
12. Orir Dzh. *Fizika. Polnyy kurs: primery, zadachi, resheniya* [Physics. Complete course: examples, tasks, solutions], Moscow: Knizhnyy dom Universitet, 2019, 752 p. (In Russ.)

Bestimmung der Einwirkungskräfte auf das ferromagnetische Teilchen im Prozess der magnetisch-thermischen Oberflächenverstärkung der Produkte aus thermoplastischen Polymeren

Zusammenfassung: Es sind die Kräfte betrachtet, die von der Seite der magnetischen und thermischen Felder auf ein ferromagnetisches Teilchen wirken, sowie die Kräfte, die seinem Eindringen von der Oberflächenschicht des Polymers entgegenwirken. Die Berechnung der Kräfte, die auf ein ferromagnetisches Teilchen beim Einbringen in die Oberflächenschicht des Polymers einwirken, erfolgt am Beispiel von Nickel und Polypropylen. Es ist das Kräftegleichgewicht berechnet, das zum Einbringen eines ferromagnetischen Partikels in die geschmolzene Oberfläche des thermoplastischen Polymers und zur stabilen Fixierung darin erforderlich ist. Die Universalität des verwendeten Ansatzes ist bei der Berechnung der Parameter der Oberflächenmodifizierung von thermoplastischen Produkten mit unterschiedlichen Eigenschaften durch ferromagnetische Teilchen unterschiedlicher Dispersion und Charakteristik gezeigt.

Détermination des forces d'impact sur la particule ferromagnétique dans le processus du renforcement de surface magnétothermique de produits en polymères thermo-plastiques

Résumé: Sont examinées les forces agissant sur la particule ferromagnétique du côté des champs magnétiques et thermiques, ainsi que les forces opposées à son introduction du côté de la couche superficielle du polymère. Est réalisée une analyse des forces agissant sur la particule ferromagnétique lors de son introduction dans la couche superficielle du polymère à l'exemple du nickel et du polypropylène. Est calculé l'équilibre des forces nécessaire pour introduire la particule de ferromagnétique dans la surface fondue du polymère thermoplastique et y maintenir une fixation stable. Est montrée la polyvalence de l'approche utilisée pour calculer les paramètres de modification de la surface des produits en thermoplastiques avec différentes propriétés de particules ferromagnétiques de dispersion et de caractéristiques différentes.

Авторы: *Воронин Николай Владимирович* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Никитин Дмитрий Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Филатов Иван Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, преподаватель специальных дисциплин, ТОГБПОУ «Приборостроительный колледж», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Грибков Алексей Николаевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Пахомов
Андрей Николаевич**

Pakhomov Andrey

Доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

24 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Развитие научных основ сушки дисперсных материалов, осложненной структурообразованием» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.



Работа выполнена на кафедре «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Н. Ц. Гатапова.

В диссертации разработана методология расчета кинетики сушки жидких дисперсных материалов, включающая классификацию кинетических кривых сушки дисперсных материалов по наличию и особенностям температурных площадок, прогнозирование кинетической кривой сушки, моделирование поверхностных структур и высыхающего слоя, решение системы уравнений взаимосвязанного тепло-массопереноса с эквивалентными граничными условиями, учитывающими поверхностное структурообразование. В связи со сложностью математического описания эффектов структурообразования в процессе сушки дисперсных материалов в работе предложен критерий формирования поверхностной структуры, обобщающий теплофизические и структурно-реологические свойства высушиваемого материала, теплофизические свойства подложки и условия сушки.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана кинетическая модель формирования поверхностной структуры с использованием построения фрактальных кластеров, кинетических зависимостей для течений жидкой фазы в высыхающем продукте, определения вероятности слипания частиц в кластере. Модель позволяет определять параметры поверхностной структуры и реологические свойства высыхающего материала в зависимости от изменяющихся во времени процессов поверхностного структурообразования. Формирование высыхающего слоя дисперсного материала описывается фрактальной моделью, учитывающей диффузионно-контролируемую агрегацию частиц.

Приказом Минобрнауки России от 04 июня 2021 года № 563/нк-14 А. Н. Пахомову присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: тепло- и массообмен в химико-технологических процессах.



**Севостьянов
Максим Владимирович**

Maksim Sevostyanov

Доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород.

25 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Теоретические основы, методология расчета и проектирования машин и агрегатов, технологических комплексов для компактиро-

вания полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (химическая промышленность).

Работа выполнена на кафедре «Технологические комплексы, машины и механизмы» ФГБОУ ВО «БГТУ им. В. Г. Шухова».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Т. Н. Ильина.

В диссертации разработаны методологические основы расчета, принципы построения и проектирования новых конструкций машин: пресс-валкового агрегата, пресс-валкового экструдера, вибро-центробежного агрегата и ресурсосберегающих технологических комплексов для компактирования полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью способами брикетирования, экструдирования и агломерации.

Получены расчетные зависимости для определения усилия и работы прессования шихт с различными физико-механическими характеристиками, учитывающие структурно-деформационное взаимодействие частиц.

Разработаны реологические модели упруго-пластического деформирования техногенных шихт, отличающиеся новым подходом к реализации технологических возможностей процессов компактирования материалов: целесообразности и последовательности отдельных стадий компактирования, удаления газообразной фазы формуемых шихт, регулирования пластических свойств полидисперсных материалов, равномерности распределения напряжений в прессуемых телах, создания условий для изменения характера и диапазона силового воздействия.

Впервые получены аналитические зависимости для расчета кинематических, конструктивно-технологических и энергосиловых параметров агрегатов для компактирования полидисперсных материалов.

Разработаны ресурсосберегающие технологические комплексы для переработки и компактирования полидисперсных материалов с различными свойствами, в том числе древесных отходов с нефтешламовым связующим, древесно-полимерных отходов для производства композиционных смесей; целлюлозно-бумажных, перлитовых и базальтовых волокнистых отходов.

Приказом Минобрнауки России от 04 июня 2021 года № 563/нк-14 М. В. Севостьянову присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: комплексная переработка и утилизация полидисперсных материалов с низкой насыпной плотностью.

**Хорохорина
Ирина Владимировна**

Irina Khorokhorina



Доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

26 января 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Развитие научно-практических основ процессов электробаромембранной очистки и концентрирования промышленных растворов химических, нефтеперерабатывающих и металлообрабатывающих производств» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «Безотходные и малоотходные технологии» и на кафедре «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор С. И. Лазарев.

Научная концепция работы заключается в комплексном теоретико-экспериментальном изучении объектов исследования (технологические растворы и мембраны) с применением современных методов оценки параметров процесса электробаромембранного разделения технологических растворов химических, нефтеперерабатывающих и металлообрабатывающих производств, что позволяет повысить их эффективность и безопасность работы с технологическими растворами.

Получены и интерпретированы экспериментальные данные по электрохимическим характеристикам электробаромембранного процесса, структурно-морфологическим характеристикам полупроницаемых мембран, характеризующихся электролитической диссоциацией функциональных групп при электробаромембранном разделении технологических растворов. Проведены экспериментальные исследования и обобщены закономерности, характеризующие основные кинетические характеристики конвективно-миграционного механизма.

Разработан комплексный подход к интенсификации электробаромембранных процессов, основанный на минимизации массы аппарата и повышении его конструктивных и прочностных характеристик.

Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении и модернизации полупроницаемых мембран с заданными селективными, проницаемыми и поляризационными свойствами для очистки, концентрирования и дифференцированного выделения ионов из растворов различного компонентного состава. Модифицированные и полученные уравнения и численные значения эмпирических коэффициентов позволяют рассчитывать качественные, производительные и тепловые характеристики процесса. Предложенная методика оценки эколого-экономической эффективности электробаромембранных методов позволяет рассчитать применение одного или нескольких аппаратов для очистки или концентрирования сточных вод.

Приказом Минобрнауки России от 04 июня 2021 года № 563/нк И. В. Хорохориной присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных интересов: оборудование для исследований и реализации электрохимических и мембранных технологий.

Копылов Сергей Александрович

Ведущий специалист Тамбовского областного государственного бюджетного учреждения «Центр определения кадастровой стоимости объектов недвижимости», г. Тамбов.

17 марта 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Аналитические и процедурные организации распределенных информационных систем в условиях неопределенности» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Ю. Ю. Громов.

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: сетевые информационные ресурсы и технологии, в том числе разработка и исследование принципов организации и функционирования распределенных информационных систем и баз данных, прикладных протоколов информационных сетей, форматов представления данных и языков информационного поиска в распределенных информационных ресурсах.

Курнос Роман Юрьевич

Старший преподаватель кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

09 июня 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Обеспечение метрологической надежности блоков аналого-цифрового преобразования в информационно-измерительных системах» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Т. И. Чернышова.

Работа выполнена на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: метрологическая надежность электронных измерительных средств.

Лакомов Денис Вячеславович

Ведущий специалист по защите информации в Тамбовском областном государственном бюджетном учреждении «Региональный информационно-технический центр», г. Тамбов.

30 марта 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Модели для организации поддержки принятия решения при анализе изображений в условиях неопределенности на основе построения контуров» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. В. Алексеев.

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и процессы» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: анализ изображений, распознавание образов, контурный анализ, кластерный анализ, нечеткая логика, поддержка принятия решения.
