

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. № 1.***

**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

**Альмов** Михаил Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова 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 Цибиловна, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, ФГБОУ ВО «ТГТУ», +7 4752 63 72 39; эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Сафаров** Джавид, Dr.-Ing, Ростокский университет, Германия

**Столин** Александр Моисеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова 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:** Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ТГТУ. Редакция журнала «Вестник ТГТУ». Главному редактору. Эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

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

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

Компьютерная верстка: О. В. Мочалина, С. Ю. Прохорская.

Подписано в печать 24.03.2021 г. Дата выхода в свет 06.04.2021 г.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 14,18; уч.-изд. л. 16,20. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 009.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 1036-5835  
e-ISSN 2542-1409

Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет», 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 Pyasov**, 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

**ADDRESS: Scientific Editor of Transactions TSTU. 106, Sovetskaya Street, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russia. E-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru**

**Учредители:** ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»  
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Издатель:** ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»  
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106; e-mail: [tstu@admin.tstu.ru](mailto: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.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-80501 от 01 марта 2021 г.

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Автоматика. Информатика.</b>	
<b>Управление. Приборы</b> .....	6
<b>Пономарев С. В., Мищенко С. В.</b> Устройство для измерения теплофизических свойств веществ методами регулярных режимов .....	6
<b>Шабанов К. Б., Алексеев В. В.</b> Применение методов интеллектуального анализа данных для повышения качества принятия решений при управлении ресурсами информационной медиасистемы .....	14
<b>Алексеев В. В., Гриднев В. А., Яковлев А. В., Машкова О. С., Савилова У. А., Шибков Д. А., Яковлева Д. А.</b> Системный подход к построению программно-аппаратного комплекса для подготовки специалистов по информационной безопасности.....	20
<b>Дмитриев О. С., Барсуков А. А.</b> Моделирование кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов на основе нейронной сети .....	31
<b>Фролов С. В., Потлов А. Ю., Фролова Т. А., Проскурин С. Г.</b> Исследование геометрии и механических свойств атеросклеротических бляшек на стенках сосудов методами интраваскулярной оптической когерентной томографии .....	42
<b>Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А., Лемкина М. В., Аль Кнфер С. Н. А., Аль Амиди М. А. Д.</b> Управление расписанием многосвязной производственной системы .....	50
<b>Уссама Беларусси, Калинин В. Ф., Терки Амел</b> Эффективное нечеткое логическое управление для оптимизации фотоэлектрической системы .....	62
<b>Меньших В. В., Чиркова Н. Е.</b> Численный метод оптимизации размещения элементов системы видеонаблюдения с учетом обеспечения их безопасности.....	73
<b>Алгазин Е. И.</b> Особенности использования линейных систем автоматизации для исследования структур временных соотношений.....	81
<b>Процессы и аппараты химических и других производств. Химия</b> .....	86
<b>Меренцов Н. А., Балашов В. А., Голованчиков А. Б., Топилин М. В., Персидский А. В.</b> Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 1. Закон Дарси и нижний предел его применения. Фильтрация жидкостей в микропористых средах.....	86
<b>Лазарев С. И., Арзамасцев А. А., Рыжкин В. Ю., Ковалева О. А., Лазарев Д. С., Дмитриев В. М., Хромова Т. А.</b> Исследование зависимости удельного выходного потока ацетатцеллюлозных пленок от градиента давления, температуры и классификация процессов мембранного разделения растворов .....	95
<b>Алхило З. А., Баранов А. А., Мансур В., Туголуков Е. Н., Пасько А. А., Першин В. Ф.</b> Моделирование процесса смешивания в дисковом гомогенизаторе-диспергаторе .....	105
<b>Машиностроение. Металлообработка</b> .....	118
<b>Продан В. Д., Божко Г. В., Фокина М. С., Воробьева Н. И.</b> Уплотнение разъемного соединения на основе гидравлического сопротивления канала протечки.....	118
<b>Материаловедение. Нанотехнологии</b> .....	124
<b>Мордасов Д. М., Мордасов М. Д.</b> Фазовый состав кремнезема Краснослободского месторождения Тамбовской области.....	124
<b>Козельская С. О., Котельников В. В., Акимов Д. А., Кутюрин Ю. Г., Будагин О. Н.</b> Экспериментальные исследования возможности оценки ресурса эксплуатации композитных конструкций при их силовом нагружении и промышленных строительных конструкций .....	132
<b>Емцев В. В., Гришин С. В., Максимов Д. И., Мамонтова Ю. Е., Стекольников Ю. А.</b> Наноматериалы в тепловых резервных источниках тока.....	149
<b>Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук</b> .....	157

## CONTENTS

<b>Automation. Information Technology.</b>	
<b>Control. Instruments</b> .....	6
<b>Ponomarev S. V., Mishchenko S. V.</b> A Device for Measuring Thermal Properties of Substances by Methods of Regular Modes .....	6
<b>Shabanov K. B., Alekseev V. V.</b> Application of Intellectual Methods of Data Analysis to Improve the Quality of Decision Making in Management of Resources for the Information Media System.....	14
<b>Alekseev V. V., Gridnev V. A., Yakovlev A. V., Mashkova O. S., Savilova U. A., Shibkov D. A., Yakovleva D. A.</b> A System Approach to the Construction of the Software and Hardware Complex for Training Information Security Specialists .....	20
<b>Dmitriev O. S., Barsukov A. A.</b> Modeling the Kinetic Characteristics of the Curing Process of Polymer Composites Based on a Neural Network .....	31
<b>Frolov S. V., Potlov A. Yu., Frolova T. A., Proskurin S. G.</b> The Study of Geometry and Mechanical Properties of Atherosclerotic Plaques on Vessel Walls by Intravascular Optical Coherent Tomography .....	42
<b>Matveikin V. G., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A., Lemkina M. V., Al Knfer S. N. A., Al Amidi M. A. D.</b> Schedule Management of a Multi-Connected Production System .....	50
<b>Ussama Belarussi, Kalinin V. F., Terki Amel</b> Effective Fuzzy Logical Control for Photoelectric System Optimization .....	62
<b>Menshikh V. V., Chirkova N. E.</b> A Numerical Method for Optimization of the Arrangement of Elements of a Video Surveillance System Taking into Account their Safety.....	73
<b>Algazin E. I.</b> Features of Using Linear Automation Systems for Research of Temporal Relation Structures .....	81
<b>Chemical Engineering and Related Industries.</b>	
<b>Chemistry</b> .....	86
<b>Merentsov N. A., Balashov V. A., Golovanchikov A. B., Topilin M. V., Persidskiy A. V.</b> The Structure of Filter Curve and Methods of Its Approximation. Part 1. Darcy's Law and the Lower Limit of Its Application. Filtration of Liquids in Microporous Media.....	86
<b>Lazarev S. I., Arzamastsev A. A., Ryzhkin V. Yu., Kovaleva O. A., Lazarev D. S., Dmitriev V. M., Khromova T. A.</b> The Study of the Correlation between a Specific Output Flow of Acetate Cellulose Films and the Pressure Gradient, Temperature and Classification of the Processes of Membrane Separation of Solutions.....	95
<b>Alkhilo Z. A., Baranov A. A., Mansur V., Tugolukov E. N., Pasko A. A., Pershin V. F.</b> Simulation of the Mixing Process in a Disc Homogenizer Disperser .....	105
<b>Mechanical Engineering. Metal Treatment</b> .....	118
<b>Prodan V. D., Bozhko G. V., Fokina M. S., Vorobyova N. I.</b> Detachable Joint Sealing Based on Leakage Duct Hydraulic Resistance .....	118
<b>Material Science. Nanotechnology</b> .....	124
<b>Mordasov D. M., Mordasov M. D.</b> Phase Composition of Silicon in the Krasnoslobodsky Deposit of the Tambov Region.....	124
<b>Kozelskaya S. O., Kotelnikov V. V., Akimov D. A., Kutururin Yu. G., Budadin O. N.</b> Experimental Studies of the Possibility of Estimating the Operating Resource of Composite Structures under their Power Loading and Industrial Building Structures .....	132
<b>Emtsev V. V., Grishin S. V., Maksimov D. I., Mamontova Yu. E., Stekolnikov Yu. A.</b> Nanomaterials in Thermal Backup Current Sources .....	149
<b>New Professors, Doctors and Candidates of Sciences</b> .....	157

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ МЕТОДАМИ РЕГУЛЯРНЫХ РЕЖИМОВ

С. В. Пономарев, С. В. Мищенко

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

**Ключевые слова:** измерение; коэффициент температуропроводности; методы регулярных режимов первого, второго и третьего рода; теплопроводность; теплофизические свойства.

**Аннотация:** Рассмотрены возможности использование единого варианта конструкции измерительной ячейки в составе установки для измерения теплофизических свойств твердых материалов с применением методов регулярных режимов первого, второго и третьего рода.

---

### Введение

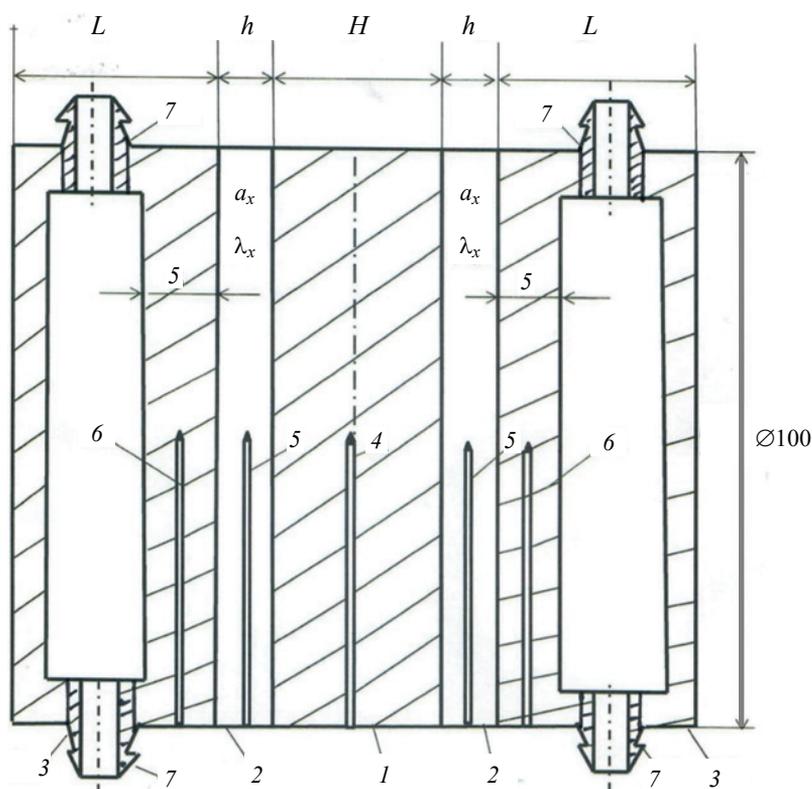
В настоящее время широко известны и достаточно часто применяются методы регулярных режимов первого, второго и третьего рода [1 – 7]. Название «Методы регулярных режимов первого, второго и третьего рода» является общепринятым не только в Российской Федерации, но и западных странах. В 1998 году профессор Нью-Йоркского университета Thomas F. Irvine отметил, что оно давно используется в Соединенных Штатах Америки, причем, данные термины заимствованы американскими специалистами по измерению теплофизических свойств веществ из результатов исследований и научных публикаций советских ученых: академика А. В. Лыкова, профессора Г. М. Кондратьева и других, чьи статьи и книги в послевоенные годы переводили на английский язык.

До настоящего времени существовало мнение, что для осуществления каждого из методов регулярных режимов первого, второго и третьего рода следует применять измерительные устройства совершенно различных конструкций, варианты которых рассмотрены в публикациях [2 – 14].

Рассмотрим вариант конструкции измерительной ячейки и схему установки, которые позволяют осуществлять измерения теплофизических свойств твердых материалов с применением любого из методов регулярных режимов первого, второго или третьего рода.

### Конструкция измерительной ячейки

Схема предлагаемой единой конструкции измерительной ячейки для осуществления методов регулярных режимов первого, второго и третьего рода приведена на рис. 1.



**Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки для осуществления методов регулярных режимов 1, 2 и 3 рода**

Для получения в процессе измерительного эксперимента необходимых режимов изменения температуры (по временным программам, задаваемым информационно-измерительной и управляющей системой (ИИУС)) на внешних поверхностях двух исследуемых образцов 2 толщиной  $h = 4 \dots 5$  мм, имеющих теплопроводность  $\lambda_x$  и коэффициента температуропроводности  $a_x$ , размещают теплообменники 3, изготовленные из высокотеплопроводного материала, в частности, стали. Внутри теплообменников, через подсоединенные к штуцерам 7 шланги, подается жидкость (теплоноситель) из термостатов, обеспечивающих либо поддержание температуры теплоносителя на заданном уровне, либо изменение температуры теплоносителя по требующейся программе.

В одной боковой стенке каждого теплообменника 3 просверлено отверстие 6 для размещения в нем термопары или термометра сопротивления, которые предназначены для измерения температур на наружных поверхностях исследуемых образцов 2.

Внутри образцов 2, изготовленных из исследуемого твердого материала, на расстоянии  $h/2$  от поверхности просверлены отверстия 5, предназначенные для размещения в них термопар или термометров сопротивления, служащих для измерения и регистрации изменения температур во времени в центре образцов в процессе проведения измерительного эксперимента.

Между двумя одинаковыми образцами 2 размещен центральный блок 1 толщиной  $H = 10$  мм, изготовленный из высокотеплопроводного материала с известными теплофизическими свойствами. В данном случае используется блок 1, изготовленный из меди, для которой известны табличные значения как теплопровод-

ности  $\lambda = 401,9$  Вт/(м·град), так и коэффициента температуропроводности  $a = 1168 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. В центре блока 1 просверлено отверстие 4, предназначенное для измерения изменения температуры на его осевой линии в процессе измерительного эксперимента с применением термопары или термометра сопротивления. Отметим, что благодаря измерению температуры в центре медного блока 1 (с известными теплофизическими свойствами) при обработке экспериментальных данных появляется возможность для каждого момента времени определять плотность теплового потока, подводимого к поверхности данного блока. Это означает, что медный блок 1 в процессе эксперимента может быть использован как тепломер.

Следует отметить, что все элементы измерительной ячейки: медный блок 1, образцы 2 из исследуемого материала и теплообменники 3 имеют цилиндрическую форму с внешним диаметром 100 мм (см. рис. 1). Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду, внешние поверхности медного блока 1, образцов 2 и теплообменников 3 покрыты легкоосъемной теплоизоляцией.

### Подключение теплообменников измерительной ячейки к жидкостным термостатам при осуществлении методов регулярных режимов 1, 2 и 3 рода

На рисунке 2 приведена схема установки для осуществления методов регулярных режимов первого, второго и третьего рода с применением рассмотренной измерительной ячейки (см. рис. 1).

При подготовке к проведению эксперимента ИИУС управляет работой электронагревателей термостатов Т1 и Т2 таким образом, чтобы в термостате Т1 установилась постоянная температура  $T_1$ , а в термостате Т2 – температура  $T_2$ . При практическом осуществлении методов регулярных режимов 1, 2 и 3 рода для подачи теплоносителей из термостатов Т1 и Т2 к теплообменникам 3 измерительной ячейки используются шланги, подключенные к штуцерам 7.

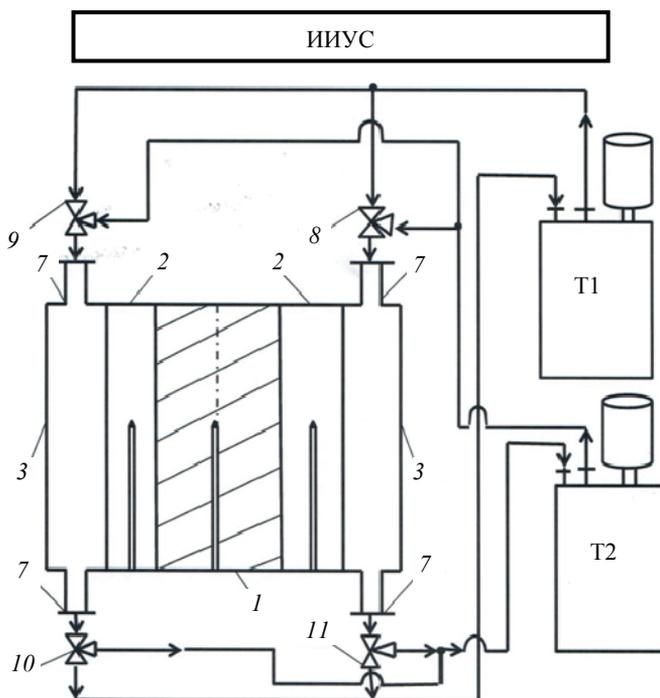


Рис. 2. Схема подключения шлангов к штуцерам (поз. 4 – 6 см. на рис. 1)

Трехходовые краны 8 – 11 позволяют по команде ИИУС переключать потоки теплоносителей (из термостатов Т1 и Т2), подаваемых в теплообменники 3. Причем, при одном положении трехходовых кранов 8 – 11 теплоноситель в теплообменники 3 подается из термостата Т1, а при другом – из Т2.

### **Подача теплоносителей к измерительной ячейке и управление работой трехходовых кранов**

*Метод регулярного режима первого рода.* Осуществление метода регулярного режима первого рода (при экспериментальном измерении теплофизических свойств образцов 2 из исследуемого материала) предусматривает выполнение следующих действий (см. рис. 2):

1) на первом (подготовительном) этапе ИИУС управляет работой электронагревателей термостатов Т1 и Т2 таким образом, чтобы в них установились постоянные температуры  $T_1$  и  $T_2$  соответственно. На данном этапе ИИУС устанавливает трехходовые краны 8 – 11 в такое положение, чтобы через теплообменники 3 пропускаться теплоноситель из термостата Т1. При этом происходит выдерживание медного блока 1 и образцов 2 исследуемого материала при заданной начальной температуре  $T_1$ , задаваемой за счет прокачивания теплоносителя с данной температурой из термостата Т1 в течение длительного промежутка времени, которого должно быть достаточно, чтобы достигнуть стационарного режима и постоянной как во времени, так и пространстве температуры в блоке 1 и образцах 2. На практике о достижении стационарного режима судят по постоянству и равенству температур в блоке 1 и образцах 2 измерительной ячейки; после достижения стационарного распределения температуры ( $T_1 = \text{const}$ ) ИИУС переходит к выполнению второго этапа;

2) на втором этапе ИИУС переключает трехходовые краны 8 – 11 в такое положение, чтобы через теплообменники 3 измерительной ячейки пропускаться теплоноситель с температурой  $T_2$  из термостата Т2. Далее, с постоянным шагом во времени, ИИУС осуществляет измерение температур в центре медного блока 1  $T_m$ , центре образцов 2  $T_{об}$  и стенках теплообменников 3  $T_c$  и регистрацию их изменений во времени с применением термопар (или термометров сопротивления), установленных в отверстиях 4 – 6 (см. рис. 1). Когда разность температур ( $T_m - T_2$ ) станет менее 10 % разности температур ( $T_1 - T_2$ ), второй этап эксперимента прекращают;

3) на третьем этапе осуществляют обработку полученных экспериментальных данных и вычисляют искомые теплофизические свойства образцов 2 из исследуемого материала.

*Метод регулярного режима второго рода.* Практическое осуществление метода регулярного режима второго рода включает следующие этапы:

1) данный этап полностью повторяет действия первого этапа метода регулярного режима первого рода, с той разницей, что выдерживание медного блока 1 и образцов 2 исследуемого материала проходит в течение относительно небольшого промежутка времени, так как метод регулярного режима второго рода не предъявляет высоких требований к достижению постоянного начального распределения температуры в блоке 1 и образцах 2;

2) на втором этапе ИИУС переключает трехходовые краны 8 – 11 в такое положение, чтобы через теплообменники 3 измерительной ячейки пропускаться теплоноситель из термостата Т2 с первоначальным значением температуры  $T_{20}$ ; с момента начала подачи теплоносителя (в измерительную ячейку) из термостата Т2 ИИУС начинает (по заранее заданной временной программе) изменять температуру теплоносителя в термостате Т2 по линейному закону

$$T_2(\tau) = T_{20} + k \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий скорость линейного изменения температуры теплоносителя во времени.

С момента начала второго этапа ИИУС с постоянным шагом во времени осуществляет измерение температур  $T_m(\tau)$ ,  $T_{об}(\tau)$  и  $T_c(\tau)$  соответственно в центре медного блока 1, в центре образцов 2, стенках теплообменников 3 и регистрацию их изменений во времени с применением термопар (или термометров сопротивления), установленных в отверстиях 4 – 6 (рис. 1). Второй этап эксперимента прекращают в тот момент времени, когда температура  $T_{об}(\tau)$  в центре образцов 2 достигнет заранее известное предельное значение температуры  $T_{пр}$ , до которой следует проводить эксперимент. При этом прекращают изменение температуры теплоносителя по закону (1), что позволяет предотвратить деградацию (потерю прочности, размягчение, разрушение) исследуемых образцов 2;

3) на третьем этапе осуществляют обработку полученных массивов (измеренных и зарегистрированных) экспериментальных данных  $T_m(\tau)$ ,  $T_{об}(\tau)$  и  $T_c(\tau)$  и вычисляют искомые теплофизические свойства образцов 2 из исследуемого материала. Следует отметить, что метод регулярного режима второго рода (в отличие от методов регулярных режимов первого и третьего рода, позволяющих в каждом отдельном эксперименте измерять искомые теплофизические свойства только в узком температурном диапазоне) с точки зрения теории позволяет при обработке полученных массивов  $T_m(\tau)$ ,  $T_{об}(\tau)$  и  $T_c(\tau)$  находить зависимости от температуры  $T$  как теплопроводности  $\lambda = \lambda(T)$ , так и коэффициента температуропроводности  $a = a(T)$  исследуемого материала.

*Метод регулярного режима третьего рода.* Процесс практического осуществления метода регулярного режима третьего рода состоит в следующем:

1) на первом (подготовительном) этапе ИИУС управляет работой электронагревателей термостатов Т1 и Т2 таким образом, чтобы в них установились постоянные температуры  $T_1$  и  $T_2$  соответственно;

2) на втором (основном) – ИИУС осуществляет управление работой трехходовых кранов 8 – 11 так, чтобы по временной программе (по периодическому закону с заданным периодом  $T_{пер}$ ) в теплообменники 3 поочередно во времени поступали теплоносители из термостатов Т1 и Т2. При этом в первую половину периода  $T_{пер}$  положение трехходовых кранов 8 – 11 устанавливается такое, чтобы через теплообменники 3 пропускаться теплоноситель с температурой  $T_1$  из термостата Т1, а во вторую – теплоноситель с температурой  $T_2$  из термостата Т2. Примерно через 15...20 периодов в глубине исследуемых образцов 2 и медном блоке 1 измерительной ячейки наступает установившийся во времени режим гармонических периодических колебаний температуры. О наступлении установившегося режима судят по достижению постоянных значений амплитуд гармонических колебаний температур  $T_m(\tau)$  и  $T_{об}(\tau)$  в медном блоке 1 и образцах 2 исследуемого материала. После достижения установившегося режима гармонических колебаний температуры, ИИУС с постоянным шагом во времени (на протяжении двух или трех периодов) осуществляет измерение температур  $T_m(\tau)$ ,  $T_{об}(\tau)$   $T_c(\tau)$  и регистрацию их изменений во времени с применением термопар (или термометров сопротивления), установленных в отверстиях 4, 5 и 6 (см. рис. 1);

3) на третьем этапе осуществляют обработку зарегистрированных массивов экспериментальных данных и вычисляют искомые теплофизические свойства образцов 2 из исследуемого материала.

## Заключение

Представленные результаты основаны на опыте разработки в ФГБОУ ВО «ТГТУ» методов и устройств для измерения теплофизических свойств веществ, базирующихся на использовании математических закономерностей регулярных режимов: а) первого рода [5, 6, 9, 12, 15]; б) второго рода [5, 6, 16]; в) третьего рода [5, 6, 11, 17, 18], и могут быть полезны научным работникам и инженерам, которые занимаются разработкой, совершенствованием и эксплуатацией теплофизических приборов и средств измерений.

### *Список литературы*

1. Лыков, А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие / А. В. Лыков. – М. : Высш. школа, 1967. – 600 с.
2. Кондратьев, Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М. : Гостехиздат, 1954. – 408 с.
3. Кондратьев, Г. М. Тепловые измерения : учеб. пособие / Г. М. Кондратьев. – М. ; Л. : Машгиз, 1957. – 244 с.
4. Черпаков, П. В. Теория регулярного теплообмена / П. В. Черпаков. – М. : Энергия, 1975. – 224 с.
5. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2-х кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Кн. 1. – 204 с.
6. Пономарев, С. В. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин [и др.] ; под ред. С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
7. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова. – СПб. : СПбГУНИПТ, 2010. – 738 с.
8. Кравчун, С. Н. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике / С. Н. Кравчун, А. А. Липаев. – Казань : Изд-во Казанского ун-та, 2006. – 208 с.
9. Пономарев, С. В. Метод и устройство для измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов / С. В. Пономарев, П. В. Балабанов, Е. С. Пономарева // Измерительная техника. – 2003. – № 9. – С. 51 – 54.
10. Ивлиев, А. Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях (анализ советского и российского опыта) / А. Д. Ивлиев // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 5. – С. 771 – 792.
11. Любимова, Д. А. Измерения теплофизических характеристик материалов методами регулярного режима третьего рода / Д. А. Любимова, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин // Измерительная техника. – 2014. – № 12. – С. 39 – 43.
12. Пономарев, С. В. Математическая обработка результатов при измерении теплопроводности и температуропроводности методом, аналогичным регулярному режиму 1 рода / С. В. Пономарев, П. В. Балабанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 3. – С. 382 – 389.
13. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е. С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 144 с.
14. Пономарев, С. В. Применение математических основ метрологии при оптимизации режимных параметров методов и основных конструктивных размеров устройств для измерения теплофизических свойств веществ : монография / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова ; под науч. ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Издательство ТГТУ, 2015. – 160 с.
15. Мищенко, С. В. Метод и измерительное устройство для определения теплофизических свойств материалов с использованием регулярного режима / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, С. В. Григорьева [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 362 – 372.
16. Балабанов, П. В. Метод и устройство для измерения теплофизических свойств образцов регенеративного продукта на матрице при нагреве их постоянным тепловым потоком / П. В. Балабанов, С. В. Пономарев, Е. Н. Балабанова // Измерительная техника. – 2009. – № 5. – С. 49 – 53.
17. Пономарев, С. В. О выборе оптимальных режимных параметров процесса измерения коэффициента температуропроводности теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода / С. В. Пономарев, Д. А. Дивина, А. С. Щечкохихин // Измерительная техника. – 2012. – № 1. – С. 47 – 49.
18. Любимова, Д. А. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода : монография / Д. А. Любимова, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. – 80 с.

## A Device for Measuring Thermal Properties of Substances by Methods of Regular Modes

S. V. Ponomarev, S. V. Mishchenko

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

**Keywords:** measurement; thermal diffusivity; methods of regular modes of the first, second and third kind; thermal conductivity; thermophysical properties.

**Abstract:** The paper considers the possibility of using a single version of the design of the measuring cell as part of an installation for measuring the thermophysical properties of solid materials using the methods of regular modes of the first, second and third kind.

### *References*

1. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti: uchebnoye posobiye* [Theory of thermal conductivity: a textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)
2. Kondrat'yev G.M. *Regulyarnyy teplovoy rezhim* [Regular thermal regime], Moscow: Gostekhizdat, 1954, 408 p. (In Russ.)
3. Kondrat'yev G.M. *Teplovyye izmereniya: uchebnoye posobiye* [Thermal measurements: a textbook], Moscow; Leningrad: Mashgiz, 1957, 244 p. (In Russ.)
4. Cherpakov P.V. *Teoriya regulyarnogo teploobmena* [Theory of regular heat exchange], Moscow: Energiya, 1975, 224 p. (In Russ.)
5. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy: monografiya. V 2 kn.* [Theoretical and practical aspects of thermophysical measurements: monograph. In 2 books], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gos. tekhn. un-ta, 2006, Book 1, 204 p. (In Russ.)
6. Ponomarev S.V. [Ed.], Mishchenko S.V., Divin A.G., Vertogradskiy V.A., Churikov A.A. *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy* [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)
7. Platunov Ye.S. [Ed.], Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: uchebnoye posobiye* [Thermophysical measurements: a textbook], St. Petersburg: SPbGU-NiPT, 2010, 738 p. (In Russ.)
8. Kravchun S.N., Lipayev A.A. *Metod periodicheskogo nagreva v eksperimental'noy teplofizike* [Method of periodic heating in experimental thermal physics], Kazan: Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 2006, 208 p. (In Russ.)
9. Ponomarev S.V., Balabanov P.V., Ponomareva Ye.S. [Method and device for measuring the thermophysical characteristics of regenerative products], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Technique], 2003, no. 9, pp. 51-54. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Ivliyev A.D. [The method of temperature waves in thermophysical research (analysis of the Soviet and Russian experience)], *Teplofizika vysokikh temperature* [Thermophysics of high temperatures], 2009, vol. 47, no. 5, pp. 771-792. (In Russ.)
11. Lyubimova D.A., Ponomarev S.V., Divin A.G. [Measurements of thermophysical characteristics of materials by methods of the regular mode of the third kind], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Technique], 2014, no. 12, pp. 39-43. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Ponomarev S.V., Balabanov P.V. [Mathematical processing of results when measuring thermal conductivity and thermal diffusivity by a method similar to the regular mode of the 1st kind], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 382-389. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Platunov Ye.S. *Teplofizicheskiye izmereniya v monotonnom rezhime* [Thermophysical measurements in monotonic mode], Leningrad: Energiya, 1973, 144 p. (In Russ.)

14. Ponomarev S.V. [Ed.], Divin A.G., Lyubimova D.A. *Primeneniye matematicheskikh osnov metrologii pri optimizatsii rezhimnykh parametrov metodov i osnovnykh konstruktsionnykh razmerov ustroystv dlya izmereniya teplofizicheskikh svoystv veshchestv: monografiya* [Application of mathematical foundations of metrology in the optimization of operating parameters of methods and basic structural dimensions of devices for measuring thermophysical properties of substances: monograph], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2015, 160 p. (In Russ.)

15. Mishchenko S.V., Ponomarev S.V., Grigor'yeva S.V., Ponomareva Ye.S., Divin A.G., Churikov A.A. [Method and measuring device for determining the thermal and physical properties of materials using a regular mode], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2001, vol. 7, no. 3, pp. 362-372. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Balabanov P.V., Ponomarev S.V., Balabanova Ye.N. [Method and device for measuring the thermophysical properties of samples of a regenerative product on a matrix when heated by a constant heat flow], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Technique], 2009, no. 5, pp. 49-53. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Ponomarev S.V., Divina D.A., Shchekochikhin A.S. [On the choice of optimal operating parameters of the process of measuring the thermal diffusivity of heat-insulating materials by the method of regular mode of the third kind], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Technique], 2012, no. 1, pp. 47-49. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Lyubimova D.A., Ponomarev S.V., Divin A.G. *Izmereniye teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom regul'yarnogo rezhima tret'yego roda: monografiya* [Measurement of thermophysical properties of heat-insulating materials by the method of regular regime of the third kind: monograph], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2014, 80 p. (In Russ.)

---

### **Vorrichtung zur Messung thermophysikalischer Eigenschaften der Substanzen durch regelmäßige Regime**

**Zusammenfassung:** Es sind die Möglichkeiten der Verwendung einer einzigen Messzellenkonstruktion als Teil einer Anlage zur Messung der thermophysikalischen Eigenschaften von festen Materialien unter Verwendung von regelmäßigen Verfahren der ersten, zweiten und dritten Art betrachtet.

---

### **Dispositif de mesure des propriétés thermophysiques des substances par des méthodes des régimes réguliers**

**Résumé:** Sont examinés les possibilités d'utiliser une version unique de la conception de la cellule de mesure dans le cadre d'une installation pour mesurer les propriétés thermiques et physiques des matériaux solides en utilisant des méthodes des modes réguliers de premier, deuxième et troisième types.

---

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

**Рецензент:** *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕСУРСАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ МЕДИАСИСТЕМЫ

**К. Б. Шабанов, В. В. Алексеев**

*Кафедра «Информационные системы и защита информации»,  
kotouchiha1@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** генетический алгоритм; интеллектуальные системы; интеллектуальный анализ данных; нечеткая логика.

**Аннотация:** В связи с актуальностью автоматизации анализа данных рассмотрены базовые методы Data mining, такие как нейронные сети, генетические алгоритмы, методы нечеткой логики. Показана сущность данных методов и их применимость на практике, в частности, методов нечеткой логики для задачи повышения качества принятия решения при управлении ресурсами информационной медиасистемы.

---

### Введение

Актуальность автоматизации анализа данных сложно переоценить, так как с каждым годом, объем данных на различных носителях растет [1, 2]. Исследования и обнаружение алгоритмами, средствами искусственного интеллекта в сырых данных скрытых знаний, которые ранее не были известны, нетривиальны, практически полезны и доступны для интерпретации человеком, то есть методы интеллектуального анализа данных (*Data mining*) на практике применяются в различных сферах: торговле, телекоммуникациях, промышленности, медицине, экономике, интернет-технологиях, страховом бизнесе и т.д.

### Постановка задачи

Необходимо найти наиболее эффективный метод для решения задачи продвижения программного продукта на рынке. Под продвижением будем понимать любую форму сообщений, используемую разработчиком программного продукта (ПП) путем проведения маркетинговых коммуникаций в целях донесения до целевой аудитории основного конкурентного преимущества продукта, которое в свою очередь влияет на выбор и использование данного ПП потребителем [3]. Программный продукт – любое мобильное приложение, независимо от модели его распространения. Информационная медиасистема – медиаресурс, используемый для проведения маркетинговых коммуникаций. В данном случае рассмотрим медиаресурс сети Интернет *YouTube*, который является ведущим видеохостингом в мире согласно рейтинговой системе *Alexa Rank*. В свою очередь медиаресурс включает в себя множество маркетинговых каналов для продвижения. Ресурсы – это маркетинговый бюджет, определенный для маркетинговых коммуникаций на конкретном медиаресурсе. Эффективность – точность анализа данных маркетинговых каналов информационной медиасистемы и ПП для принятия решения о вложении маркетингового бюджета в конкретный маркетинговый канал.

Цель статьи – рассмотреть базовые методы *Data mining* в разрезе повышения эффективности управления ресурсами для продвижения ПП в информационной медиасистеме.

### **Базовые методы интеллектуального анализа данных и решаемые ими задачи**

*Нейронные сети.* Класс таких моделей основан на биологической аналогии с мозгом человека и предназначен, после прохождения этапа так называемого обучения на имеющихся данных, для решения разнообразных задач анализа данных [4].

Нейронные сети являются обучаемыми, и после этапа выбора архитектуры сети, который в свою очередь также является важным, так как от него зависит итоговая эффективность работы сети, происходит процесс обучения.

Обучение может быть двух видов: с учителем и без него.

В первом случае сети предоставляется обучающая выборка (целевой вектор), выходной результат работы сети (выходной вектор) сравнивается с целевым вектором, и в соответствии с алгоритмом обучения изменяются веса. Спектр задач, решаемых нейронными сетями, достаточно широк: классификация, кластеризация, аппроксимация, прогноз, оптимизация, управление [4].

*Генетические алгоритмы.* Данные системы появились в процессе поиска новых методов математических расчетов, поскольку возможности как детерминированных, так и статистических методов оказались недостаточными для описания вновь появляющихся классов систем.

В методах эффективного поиска сформировалось понятие «эволюционные вычисления». В связи с этим оказалось полезным сочетать детерминированную составляющую алгоритмов со случайной [5]. Данные методы относятся к универсальным методам оптимизации, позволяют решать задачи разных типов и различной сложности, отличаются возможностью реализации как однокритериального поиска, так и многокритериального.

*Нечеткая логика.* Суть систем, основанных на нечеткой логике, лежит в понятии нечетких множеств.

Пусть  $E$  – универсальное множество,  $x$  – элемент  $E$ , а  $G$  – некоторое свойство. Обычное (четкое) подмножество  $A$  универсального множества  $E$ , элементы которого удовлетворяют свойству  $G$ , определяется как множество упорядоченных пар

$$A = \left\{ \begin{array}{c} \mu_A(x) \\ x \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция, принимающая значение 1, если  $x$  удовлетворяет свойству  $G$ , и 0 – в противном случае.

Нечеткое подмножество отличается от обычного тем, что для элементов  $x$  из  $E$  нет однозначного ответа «да – нет» относительно свойства  $G$ . В связи с этим нечеткое подмножество  $A$  определяется по формуле (1), но в данном случае  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция принадлежности, принимающая значение в некотором вполне упорядоченном множестве  $M = [0, 1]$  [4].

В 1992 г. Ванг доказал следующую теорему: для каждой вещественной непрерывной функции  $G(x)$ , на компактном (замкнутом) множестве  $U$ , и для произвольного  $\varepsilon > 0$  существует нечеткая система, формирующая выходную функцию  $f(x)$ , такую, что

$$\sup \|G(x) - F(x)\| \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\|*\|$  – символ принятого расстояния между функциями [6].

Данный метод целесообразно применять при моделировании организационно-технических систем, когда неотъемлемым фактором их функционирования является человек. В основе этого высказывания лежит принцип несовместимости Заде, который утверждает, что по мере усложнения системы способность дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения уменьшается.

Данный метод используется в поддержке принятия решений, когда информации не хватает и она невысокого качества. В этом случае лицо принимающее решение (ЛПР) отходит от точечных числовых оценок и заменяет их качественными лингвистическими переменными на естественном языке (высокий\низкий, много\мало\nормально и т.д.).

Для решения рассматриваемой задачи ЛПР необходимо проанализировать следующие данные:

- заработок на одного пользователя за все время пользования продуктом в разбивке по странам;
- целевая аудитория ПП и маркетингового канала;
- средняя конверсия в установку для ПП;
- тематика ПП и маркетингового канала;
- среднее количество просмотров маркетинговой коммуникации;
- кликабельность для конкретного формата маркетинговой коммуникации.

На основе анализа вышеперечисленных данных ЛПР прогнозирует эффективность вложений ресурсов в данный маркетинговый канал с применением таких критериев, как окупаемость инвестиций; совпадение тематик и др.

Каждый из данных факторов является сложным, а оценка совпадения тематик – нечетким фактором. Исходя из данной специфики, выбор метода нечеткой логики является обусловленным.

### **Применение нечеткой логики для повышения эффективности управления ресурсами информационной медиасистемы**

Для построения модели нечеткого логического вывода определим лингвистические переменные (табл. 1).

Граничные значения каждой из функций принадлежности для каждого термина определены экспертным путем.

В качестве алгоритма нечеткого логического вывода использовался алгоритм Мамдани, как самый доступный для моделирования. Далее опишем функции принадлежности для термов лингвистических переменных. Покажем, например, функции принадлежности для термов переменной «Окупаемость»:

– «Не окупится»:

$$\mu(x, 50, 100) \equiv \begin{cases} 1, & x \leq 50; \\ 1 - \frac{2(x-50)^2}{2500}, & 50 < x < 75; \\ \frac{2(100-x)^2}{2500}, & 75 < x < 100; \\ 0, & x \geq 100. \end{cases} \quad (3)$$

– «Окупится»:

$$\mu(x, 5, 100) \equiv \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-100}{5}\right)^2}; \\ 0 \leq x < \infty. \end{cases} \quad (4)$$

Лингвистические переменные и их термы

Лингвистическая переменная	Область определения значений входных значений	Термы		
		Окупаемость	[0; ∞]	Не окупится
Пол	[0; 100]	Плохой	Удовлетворительный	Хороший
Возраст				
Тематика				

– «Принесет прибыль»:

$$\mu(x, 100, 120) \equiv \begin{cases} 1, & x \leq 100; \\ \frac{2(x-100)^2}{400}, & 100 < x \leq 110; \\ 1 - \frac{2(120-x)^2}{400}, & 110 < x < 120; \\ 1, & 120 \leq x. \end{cases} \quad (5)$$

Смоделируем данную систему нечеткого логического вывода с помощью пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB *Fuzzy Logic Toolbox*.

Для того чтобы проверить адекватность применяемого метода, рассчитаем реальные значения характеристик маркетинговых каналов, с которыми уже проводились маркетинговые коммуникации для конкретного ПП.

Задача проверки адекватности разработанных моделей будет определяться разницей между значениями процента ошибок эксперта  $\omega$  и процента ошибок системы  $\omega'$

$$\Delta W = \omega - \omega', \quad (6)$$

где  $\omega = \frac{e}{E} \cdot 100\%$ ,  $e$  – число ошибок,  $E$  – общее число решений.

В случае если  $\Delta W \geq 0$ , то можно сделать вывод об эффективности использования данного метода. Если  $\Delta W \leq 0$  – есть необходимость в дальнейшей настройке системы, либо выборе другого метода.

Далее рассчитаем значения процента ошибок  $\omega$  для эксперта

$$\omega = \frac{5}{20} \cdot 100\% = 25\%$$

и системы

$$\omega' = \frac{2}{20} \cdot 100\% = 10\%.$$

Найдем разность  $\Delta W$

$$\Delta W = 25 - 10 = 15\%.$$

## Заключение

Исходя из полученных данных, сделан вывод, что метод нечеткой логики применим для задачи повышения качества принятия решений при управлении ресурсами информационной медиасистемы и позволяет снизить процент ошибок при принятии решений на 15 %.

### Список литературы

1. Hilbert, M. The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information / M. Hilbert, P. Lopez // *Science*. – 2011. – Vol. 332. – P. 60 – 65.
2. The Zettabyte Era: Trends and Analysis. – Текст : электронный // Cisco. – 2015. – 29 p. – URL : [https://files.ifi.uzh.ch/hilty/t/Literature\\_by\\_RQs/RQ%20102/2015\\_Cisco\\_Zettabyte\\_Era.pdf](https://files.ifi.uzh.ch/hilty/t/Literature_by_RQs/RQ%20102/2015_Cisco_Zettabyte_Era.pdf) (дата обращения: 11.12.2020).
3. Ехлаков, Ю. П. Основные положения по разработке программы продвижения программных продуктов в сети Интернет / Ю. П. Ехлаков, Д. Бараксанов // *Бизнес-информатика*. – 2012. – № 4 (22). – С. 33 – 39.
4. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.
5. Советов, Б. Я. Интеллектуальные системы и технологии : учеб. / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовской. – М. : Академия, 2013. – 320 с.
6. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.

---

## Application of Intellectual Methods of Data Analysis to Improve the Quality of Decision Making in Management of Resources for the Information Media System

K. V. Shabanov, V. V. Alekseev

*Department of Information Systems and Information Security,  
kotouchihal@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** genetic algorithm; intelligent systems; data mining; fuzzy logic.

**Abstract:** In connection with the relevance of data analysis automation, basic data mining methods are considered, such as neural networks, genetic algorithms, and fuzzy logic methods. The essence of these methods and their practical applicability are shown, in particular, methods of fuzzy logic for the problem of improving the quality of decision-making when managing the resources of the information media system.

### References

1. Hilbert M., Lopez P. The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information, *Science*, 2011, vol. 332, pp. 60-65.
2. [https://files.ifi.uzh.ch/hilty/t/Literature\\_by\\_RQs/RQ%20102/2015\\_Cisco\\_Zettabyte\\_Era.pdf](https://files.ifi.uzh.ch/hilty/t/Literature_by_RQs/RQ%20102/2015_Cisco_Zettabyte_Era.pdf) (accessed 11 December 2020).
3. Yekhlakov Yu.P., Baraksanov D. [Basic provisions for the development of a program for the promotion of software products on the Internet], *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2012, no. 4 (22), pp. 33-39. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Stepanenko V.V., Kholod I.I. *Metody i modeli analiza dannykh: OLAP i Data Mining* [Methods and models for data analysis: OLAP and Data Mining], St. Petersburg: BKHV-Peterburg, 2004, 336 p. (In Russ.)

5. Sovetov B.Ya., Tsekhanovskiy V.V., Chertovskoy V.D. *Intellektual'nyye sistemy i tekhnologii: uchebnyk* [Intelligent systems and technologies: textbook], Moscow: Akademiya, 2013, 320 p. (In Russ.)

6. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennyye neyronnyye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice], Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2002, 382 p. (In Russ.)

---

### **Anwendung von Miningmethoden der Daten zur Verbesserung der Qualität der Entscheidungsfindung bei der Verwaltung der Ressourcen des Informationsmediensystems**

**Zusammenfassung:** Im Zusammenhang mit der Relevanz der Automatisierung der Datenanalyse werden grundlegende Data-Mining-Methoden wie neuronale Netze, genetische Algorithmen und Fuzzy-Logik-Methoden untersucht. Es ist das Wesen dieser Methoden und ihre Anwendbarkeit in der Praxis, insbesondere die Methoden der Fuzzy-Logik für das Problem der Verbesserung der Qualität der Entscheidungsfindung bei der Verwaltung der Ressourcen des Informationsmediensystems, gezeigt.

---

### **Utilisation des méthodes d'analyse des données pour l'élévation de la qualité de la prise des décisions dans la gestion des ressources du système de médias**

**Résumé:** Compte tenu de l'actualité de l'automatisation de l'analyse des données, sont examinées les méthodes de base Data mining telles que les réseaux neuronaux, les algorithmes génétiques et les méthodes de logique floue. Il est montrée l'essence de ces méthodes et leur applicabilité dans la pratique, en particulier des méthodes de logique floue pour améliorer la qualité de la prise des décisions dans la gestion des ressources du système de médias d'information.

---

**Авторы:** *Шабанов Константин Борисович* – аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Алексеев Владимир Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Тютюнник Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**В. В. Алексеев, В. А. Гриднев, А. В. Яковлев,  
О. С. Машкова, У. А. Савилова, Д. А. Шибков, Д. А. Яковлева**

*Кафедра «Информационные системы и защита информации»,  
yava73@bk.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** акустический канал; акустоэлектрический канал; виброакустический канал; канал ПЭМИН; канал утечки информации; программно-аппаратный комплекс.

**Аннотация:** В целях подготовки специалистов по информационной безопасности (ИБ) разработан программно-аппаратный комплекс «Средства защиты информации от утечки по техническим каналам», предоставляющий возможность изучать процесс утечки информации по техническим каналам и методы ее защиты, а также применять разнообразные модули и дополнительное программное обеспечение (ПО), наглядно демонстрирующие особенности различных методов обеспечения ИБ. Показан состав данного комплекса: лабораторные стенды, моделирующие акустический, виброакустический, акустоэлектрический каналы и канал побочных электромагнитных излучений и наводок. На каждом из стендов размещены средства защиты информации (СЗИ), противодействующие утечке конфиденциальной информации по соответствующему техническому каналу. Для настройки СЗИ акустического и виброакустического каналов разработано ПО «ИСИДОРА», позволяющее регулировать уровень создаваемой акустической помехи для соответствия требованиям защищенности помещения и одновременно комфортного разговора в данном помещении.

---

### Введение

Подготовка специалистов по информационной безопасности (ИБ) требует значительных финансовых затрат. Федеральный государственный образовательный стандарт подразумевает несколько направлений подготовки специалистов в области ИБ. Одной из особенностей современного этапа научного познания и высшего образования является подход к изучаемым объектам и объектам исследования как к системам. Другая особенность процесса подготовки – иерархичность познания, требующая многоуровневого изучения предмета: непосредственное изучение самого предмета – «собственный» уровень, изучение предмета как элемента более широкой системы – «вышестоящий» уровень и, наконец, изучение этого предмета в соотношении с составляющими данный предмет элементами – «нижестоящий» уровень.

Изучение закономерностей систем и комплексов, а также их интегративных свойств, раскрытие базисных механизмов интеграции, нацеленность на получение количественных характеристик, создание методов, сужающих неоднозначность

понятий, определений, оценок – все это системный подход требует рассматривать не изолированно, а в единстве связей с окружающей средой, постигать сущность каждой связи и отдельного элемента, проводить ассоциации между общими и частными целями. Таким образом формируется особый метод мышления, позволяющий гибко реагировать на изменения обстановки и принимать обоснованные решения [1, 2].

Экономически выгодным решением станет разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК), подходящего для разных направлений подготовки специалистов благодаря сменным модулям и дополнительному программному обеспечению (ПО), моделирующим различные угрозы ИБ и методы защиты информации.

Под программно-аппаратным комплексом понимается набор программных и аппаратных средств, совместно функционирующих в целях решения одной или нескольких сходных задач. Программно-аппаратный комплекс представлен в виде лабораторных стендов, моделирующих акустический, виброакустический, акусто-электрический и электромагнитный каналы, а также соответствующие средства защиты информации (СЗИ). Кроме того, в состав комплекса входит специальное ПО, наглядно демонстрирующее воздействие СЗИ на канал утечки, а также ПО, предоставляющее возможность определить необходимость применения данных средств.

Первоначально разработанный ПАК «Средства защиты информации от утечки по техническим каналам» предназначен для специализации «Безопасность открытых информационных систем», однако в дальнейшем может быть доработан таким образом, чтобы стать универсальным для всех направлений подготовки специалистов по ИБ.

Одним из немаловажных аспектов ИБ открытых систем является изучение технических каналов утечки информации. Стоит отметить, что для будущих специалистов важно не только изучение видов и особенностей технических каналов, но и понимание физических процессов, лежащих в их основе, так как это позволит в полной мере оценивать применяемые меры защиты. Для решения данной задачи разработан ПАК «Средства защиты информации от утечки по техническим каналам», предназначенный:

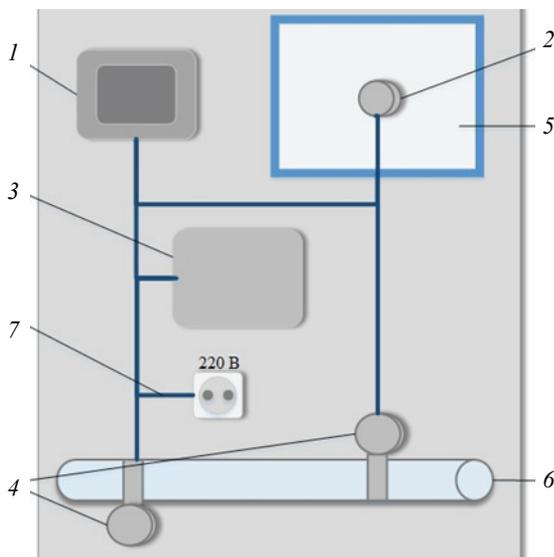
- для наглядной демонстрации типовых вариантов утечки информации по акустическому, виброакустическому, акустоэлектрическому каналам и каналу побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН);
- освоения методов активной защиты информации от утечки по акустическому, виброакустическому, акустоэлектрическому и ПЭМИН каналам;
- оценивания эффективности защиты акустической информации и настройки с помощью разработанного ПО уровня акустического шума и интенсивности вибродатчиков;
- демонстрации воздействия технических СЗИ на канал ПЭМИН с помощью разработанного ПО.

### **Защита информации от утечки по акустическим и виброакустическим каналам**

Для перехвата речевой информации могут быть применены различные портативные средства акустической речевой разведки, осуществляющие перехват по прямому акустическому или виброакустическому каналу [3, 4].

Система активной акустической и вибрационной защиты речевой информации представляет собой лабораторный стенд (рис. 1), состоящий из следующих компонентов:

- генератор-акустоизлучатель «Соната – СА65М» 1;
- генератор-виброизлучатель «Соната – СП45М» 2;



**Рис. 1. Лабораторный стенд «Система активной акустической и вибрационной защиты речевой информации»**

- блок электропитания и управления «Соната – ИПЗ» 3;
- генераторы-вибровозбудители «Соната – СВ45М» 4;
- элементы поддерживающей инфраструктуры (фрагмент оконной рамы со стеклом 5 и отрезок трубы системы водо-, газо- и теплоснабжения) 6;
- соединительные провода и подключение к сети электропитания 220 В 7.

Данный стенд позволяет демонстрировать активный метод защиты акустической информации. На нем представлены наиболее распространенные технические СЗИ, создающие акустические и вибрационные помехи, маскирующие информационный акустический сигнал.

Генератор-акустоизлучатель «Соната – СА65М» представляет собой комплекс генератора шума и электроакустического преобразователя, необходимый для создания акустического шума в пространстве. Генератор-виброизлучатель «Соната – СП45М» – комплекс специализированного электроакустического преобразователя и генератора шума, предназначенный для создания шумовых вибраций в тонких элементах помещения таких, как оконная рама со стеклом. Блок электропитания и управления «Соната – ИПЗ» обеспечивает электропитание и объединение технических СЗИ между собой. Генератор-виброизлучатель «Соната – СВ45М» представляет собой комплекс широкополосного электроакустического преобразователя и генератора шума, предназначенный для создания шумовых вибраций в массивных элементах помещения, таких как трубы систем водо-, газо- и теплоснабжения.

Использование рассмотренной системы позволяет исключить:

- возможность подслушивания в условиях недостаточной звукоизоляции в помещении;
- применение микрофонов, установленных на трубах водо-, газо- и теплоснабжения;
- применение средств съема речевой информации с оконных стекол.

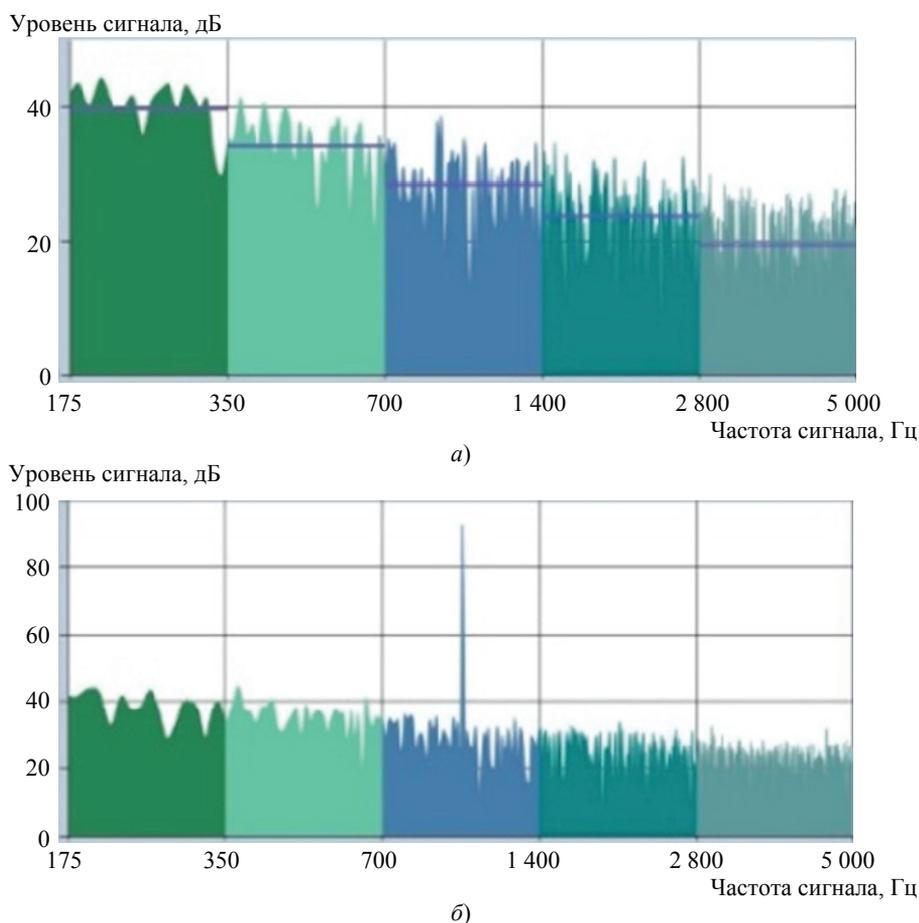
Акустические помехи, создаваемые техническими СЗИ, не должны приносить существенный дискомфорт присутствующим в помещении участникам диалога. Таким образом, возникает проблема приведения мощности акустической помехи к оптимальному уровню, удовлетворяющему и требованиям защищенности помещения, и комфортному ведению разговора.

В качестве показателя оценки эффективности защиты от утечки по акустическому каналу наиболее часто используют словесную разборчивость. Известно, что составление подробной справки о содержании перехваченного разговора невозможно при словесной разборчивости менее 60 – 70 %, а краткой справки-аннотации – менее 40 – 50 %. При словесной разборчивости менее 20 – 30 % значительно затруднено установление даже предмета ведущегося разговора, а при менее 10 % – практически невозможно, даже при использовании современной техники фильтрации помех [5].

Для решения проблемы нахождения оптимального уровня акустической помехи необходимо вычислить уровень словесной разборчивости за пределами защищаемого помещения. Для проведения расчетов разработано ПО «Измерительная система дополненной реальности – Акустика» (ПО «ИСИДОРА») [6].

Данное ПО реализует инструментально-расчетный метод, использующий измерение отношений уровней речевого сигнала и шума (рис. 2, *а*). Для проведения расчетов диапазон частот делится на  $N$  октав, и измерения происходят на среднегеометрической частоте каждой октавы. Для имитации речевого сигнала используются тест-сигналы заданной мощности (рис. 2, *б*).

Вывод результатов работы программного обеспечения комплекса представлен в табл. 1.



**Рис. 2. Измерение уровня шума (*а*) и значения тест-сигнала (*б*) в ПО «ИСИДОРА»**

Вывод результатов работы в ПО «ИСИДОРА»

№ октавы	Диапазон частот	Средняя частота	Уровень, дБ		$W$
			сигнала	шума	
1	175...350	250	72,020	42,998	0,996
2	350...700	500	83,257	41,168	
3	700...1 400	1000	92,700	28,482	
4	1 400...2 800	2000	84,251	26,900	
5	2 800...5 600	4000	83,813	22,762	

В результате работы ПО «ИСИДОРА» определяет уровень словесной разборчивости  $W$ , позволяющий сделать вывод о необходимости использования технических СЗИ. В случае применения технических СЗИ и создания комфортных условий ведения переговоров возможно изменение уровня создаваемой акустической помехи, соответствующего требованиям защищенности помещения.

### Защита информации от утечки за счет ПЭМИН

Утечка информации в системах обработки данных возможна также за счет перехвата ПЭМИН, создаваемого техническими средствами. Наиболее опасными источниками ПЭМИН считаются видеотракты вычислительных систем, проводные каналы связи, магнитные накопители и устройства ввода/вывода [7, 8].

Система активной защиты информации от утечки за счет ПЭМИН представляет собой лабораторный стенд (рис. 3), состоящий из следующих компонентов:

- средство активной защиты информации от утечки за счет ПЭМИН «Соната – Р2» 1 (на стенде также представлена плата данного средства 2);
- устройство активной защиты информации от утечки за счет ПЭМИН с регулировкой мощности «СТБ211 Берилл» 3;
- соединительные провода и подключение к сети электропитания 220 В 4.

Данный стенд демонстрирует возможности метода активной защиты информации утечки за счет ПЭМИН. Преимуществом данного метода является не только предотвращение угрозы утечки информации за счет ПЭМИН, но и таких угроз, как использование подслушивающих устройств, а также проведение разведки на основе излучения устройств, находящихся в помещении. Указанный метод предусматривает использование специальных широкополосных генераторов помех [9].

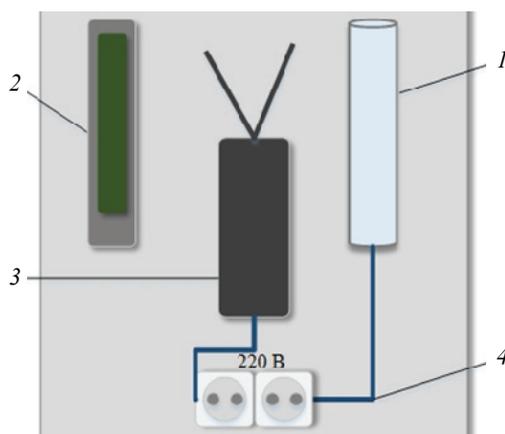


Рис. 3. Лабораторный стенд «Система активной защиты информации от утечки за счет ПЭМИН»

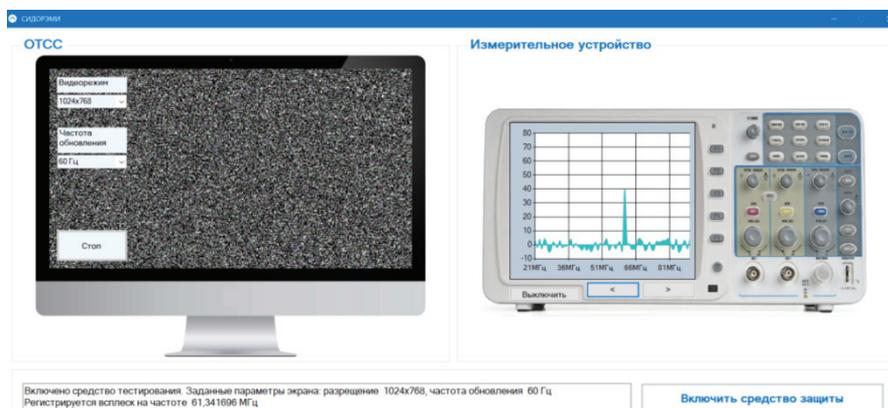
Устройство «Соната – Р2» используется для защиты информации, которая обрабатывается вычислительной техникой, от утечки по каналам ПЭМИН на линии заземления, вспомогательных технических средств и систем, электропитания и других коммуникаций.

Средство активной защиты информации с регулировкой мощности «СТБ211 Берилл» применяется для защиты информации от ее утечки по каналу ПЭМИН.

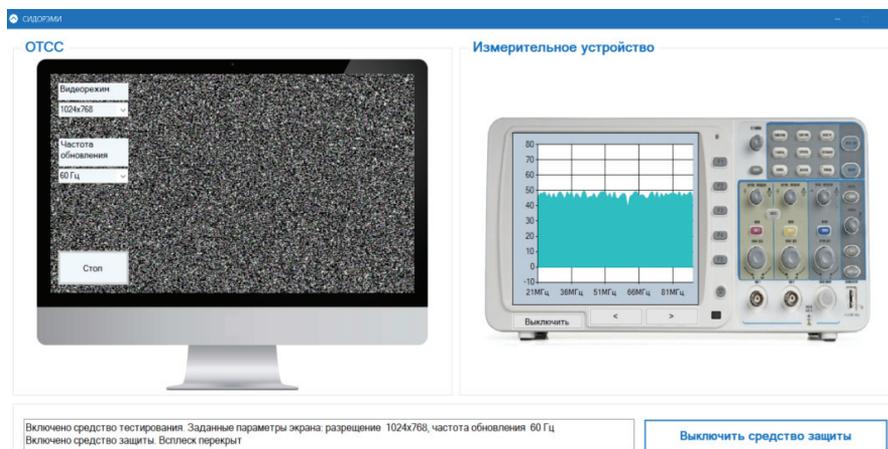
Для демонстрации воздействия технических СЗИ на канал утечки за счет ПЭМИН разработано ПО «Система дополненной реальности – Электромагнитное излучение» (ПО «СИДОРЭМИ»). В данном ПО реализована методика измерения утечки по каналу ПЭМИН от видеотракта компьютера, представленного как основное техническое средство. В качестве измерительного устройства используется модель спектроанализатора.

На рисунке 4, а, отображена регистрация излучения на спектрограмме на частотах, кратных частотам генерации побочного электромагнитного излучения (ПЭМИ). Воздействие активации СЗИ на канал утечки ПЭМИ представлено на рис. 4, б.

Таким образом, показано, что СЗИ «Соната – Р2» полностью нейтрализует канал утечки ПЭМИ, перекрывая весь динамический диапазон канала.



а)



б)

**Рис. 4. Работа ПО «СИДОРЭМИ» при выключенном (а) и включенном (б) средстве защиты**

## Защита информации от утечки по каналу акустоэлектрических преобразований

Особую опасность представляет утечка информации по акустоэлектрическому каналу, образуемому из-за наличия преобразователей информативного сигнала из акустического в электрический в электрических цепях технических устройств. Возникновение такого канала предоставляет возможность нарушителю получить доступ к информации без проникновения в помещение [10, 11].

Система активной защиты информации от утечки по акустоэлектрическому каналу представляет собой лабораторный стенд (рис. 5), состоящий из следующих компонентов:

- оконечное устройство телефонной линии 1;
- рабочая станция 2;
- ADSL-сплиттер 3;
- средство зашумления телефонной линии 4;
- акустический сейф «Ладья» 5;
- соединительные провода и подключение к сети электропитания 220 В 6.

Представленный стенд позволяет исследовать возможности активного метода защиты информации от утечки по акустоэлектрическому каналу. На нем представлены технические СЗИ, изолирующие устройства от внешней среды (разрыв телефонной и телекоммуникационной линий и зашумления проводных линий в определенном диапазоне).

ADSL-сплиттер предназначен для частотного разделения каналов. Применяется в телекоммуникационных сетях при использовании общей телефонной линии различными средствами связи, такими как аналоговый телефон и ADSL-модем 7.

Акустический сейф «Ладья» предназначен для защиты речевой информации от прослушивания через мобильный телефон посредством его несанкционированной удаленной активации. За счет акустического зашумления тракта передачи к телефону, помещенному в сейф, невозможно дистанционно подключиться, а, следовательно, конфиденциальный разговор не может быть прослушан.

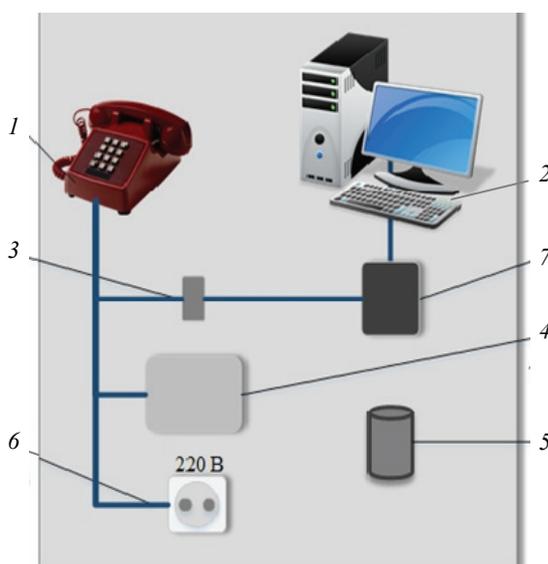


Рис. 5. Лабораторный стенд «Система активной защиты информации от утечки по акустоэлектрическому каналу»

## Заключение

Программно-аппаратный комплекс «Средства защиты информации от утечки по техническим каналам» позволяет демонстрировать как сами каналы утечки, так и средства их нейтрализации, представлять типовые варианты утечки информации по техническим каналам и широкий спектр средств активной защиты информации. В состав ПАК входит ПО «СИДОРЭМИ», позволяющее наглядно изучить принципы воздействия технических СЗИ на канал ПЭМИН, а также ПО «ИСИДОРА», способное устанавливать необходимость применения СЗИ и настраивать уровень маскирующих сигналов, обеспечивающих допустимый уровень словесной разборчивости на границе контролируемой зоны. К преимуществам разработанного ПАК «Средства защиты информации от утечки по техническим каналам» стоит отнести возможность совместной работы с компьютером, микрофонами, различными источниками звука.

Разработанный комплекс целесообразно использовать в процессе обучения, например, по специализации «Безопасность открытых информационных систем», для понимания физических процессов, лежащих в основе технических каналов утечки информации, и механизмов защиты. В дальнейшем за счет сменных модулей и дополнительного ПО ПАК станет универсальным для всех направлений подготовки специалистов по ИБ. Относительно невысокая стоимость и простота освоения работы с комплексом выделяют данный комплекс среди существующих аналогов.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-37-90146/20 «Методология построения научно-исследовательских комплексов мониторинга характеристик защищенности конфиденциальной информации на основе системного подхода».*

### Список литературы

1. Антонов, А. В. Системный анализ / А. В. Антонов. – М. : Высш. школа, 2008. – 456 с.
2. Андреев, А. Ф. Аналитическое обеспечение принятия управленческих решений в таможенных органах Российской Федерации / А. Ф. Андреев, В. В. Макрусев. – М. : Российская таможенная академия, 2014. – 170 с.
3. Хорев, А. А. Техническая защита информации / А. А. Хорев. – М. : НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.
4. Герасименко, В. Г. Методы защиты акустической речевой информации от утечки по техническим каналам / В. Г. Герасименко, Ю. Н. Лаврухин, В. И. Тупота. – М. : РЦИБ Факел, 2008. – 256 с.
5. Корепанов, А. Г. Оценка защищенности помещений от утечки речевой информации / А. Г. Корепанов, А. В. Михеев // Общество, наука, инновации : материалы Всероссийской ежегодной науч.-практ. конф., 15 – 26 апреля 2013 г., Киров. – Киров, 2013. – С. 1455 – 1459.
6. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2019667587. Измерительная система дополненной реальности – Акустика (ИСИДОРА) / О. С. Машкова, У. А. Савилова, Д. А. Шибков, А. В. Яковлев, Д. А. Яковлева (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 25 декабря 2019 г.
7. Горбунова, А. А. Электромагнитные излучения технических средств. Идентификация параметров источников побочных электромагнитных излучений технического средства по измерениям в ближайшей зоне / А. А. Горбунова. – М. : Ленанд, 2016. – 144 с.
8. Васильев, Р. А. Обнаружение побочных электромагнитных излучений и наводок с помощью программно-аппаратного комплекса «Легенда» / Р. А. Васильев, Л. Ю. Ротков. – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2018. – 45 с.

9. Киреева, Н. В. Утечка информации по каналам ПЭМИ и способы их защиты / Н. В. Киреева, А. В. Семенов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 8-4. – С. 499 – 504.

10. Халяпин, Д. Б. Технические каналы утечки речевой информации через извещатели охранно-пожарной сигнализации / Д. Б. Халяпин, Е. Б. Терентьев // Известия Таганрогского радиотехнического университета. – 2003. – № 4 (33). – С. 110–111.

11. Сапожков, М. А. Электроакустика / М. А. Сапожков. – М. : Связь, 1978. – 272 с.

---

## A System Approach to the Construction of the Software and Hardware Complex for Training Information Security Specialists

V. V. Alekseev, V. A. Gridnev, A. V. Yakovlev, O. S. Mashkova,  
U. A. Savilova, D. A. Shibkov, D. A. Yakovleva

*Department of Information Systems and Information Security,  
yava73@bk.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** acoustic channel; acoustoelectric channel; vibroacoustic channel; PEMIN channel; information leakage channel; hardware and software system.

**Abstract:** In order to train specialists in information security (IS), a software and hardware complex “Means of protecting information from leakage through technical channels” has been developed; it provides an opportunity to study the process of information leakage through technical channels and methods of its protection, as well as apply various modules and additional software (software) that clearly demonstrate the features of various methods of information security. The composition of this complex is shown: laboratory stands simulating acoustic, vibroacoustic, acoustoelectric channels and a channel of side electromagnetic radiation and interference. At each of the stands there are information security means (ISMs) that prevent the leakage of confidential information through the corresponding technical channel.

To adjust the ISMs for acoustic and vibroacoustic channels, the ISIDORA software has been developed; it allows adjusting the level of the generated acoustic interference to meet the requirements of the security of the room and at the same time to have a comfortable conversation in this room.

### *References*

1. Antonov A.B. *Sistemnyy analiz* [System analysis], Moscow: Vysshaya shkola, 2008, 456 p. (In Russ.)

2. Andreyev A.F., Makrusev V.V. *Analiticheskoye obespecheniye prinyatiya upravlencheskikh resheniy v tamozhennykh organakh Rossiyskoy Federatsii* [Analytical support for making managerial decisions in the customs authorities of the Russian Federation], Moscow: Rossiyskaya tamozhennaya akademiya, 2014, 170 p. (In Russ.)

3. Khorev A.A. *Tekhnicheskaya zashchita informatsii* [Technical protection of information], Moscow: NPTS «Analitika», 2008, 436 p. (In Russ.)

4. Gerasimenko V.G., Lavrukhin Yu.N., Tupota V.I. *Metody zashchity akusticheskoy rechevoy informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalams* [Methods of protecting acoustic speech information from leakage through technical channels], Moscow: RTSIB Fakel, 2008, 256 p. (In Russ.)

5. Korepanov A.G., Mikheyev A.V. *Obshchestvo, nauka, innovatsii* [Society, science, innovations], Proceedings of the All-Russian annual scientific-practical conference, 15 - 26 April, 2013, Kirov, 2013, pp. 1455-1459. (In Russ.)
  6. Mashkova O.S., Savilova U.A., Shibkov D.A., Yakovlev A.V., Yakovleva D.A. *Izmeritel'naya sistema dopolnennoy real'nosti - Akustika (ISIDORA)* [Measuring system of augmented reality - Acoustics (ISIDORA)], Russian Federation, 2019, Certificate of state registration of computer programs No. 20196675877. (In Russ.)
  7. Gorbunova A.A. *Elektromagnitnyye izlucheniya tekhnicheskikh sredstv. Identifikatsiya parametrov istochnikov pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniya tekhnicheskogo sredstva po izmereniyam v blizhayshey zone* [Electromagnetic radiation of technical means. Identification of parameters of sources of spurious electromagnetic radiation of a technical device by measurements in the nearest zone], Moscow: Lenand, 2016, 144 p. (In Russ.)
  8. Vasil'yev R.A., Rotkov L.Yu. *Obnaruzheniye pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniya i navodok s pomoshch'yu programmno-apparatnogo kompleksa «Legenda»* [Detection of spurious electromagnetic radiation and interference with the help of the software and hardware complex "Legend"], Nizhny Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2018, 45 p. (In Russ.)
  9. Kireyeva N.V., Semenov A.V. [Information leakage through PEMI channels and ways of their protection], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2016, no. 8-4, pp. 499-504. (In Russ., abstract in Eng.)
  10. Khalyapin D.B., Terent'yev Ye.B. [Technical channels of speech information leakage through detectors of the security and fire alarm], *Izvestiya Taganrogskogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Taganrog Radio Engineering University], 2003, no. 4 (33), pp. 110–111. (In Russ.)
  11. Sapozhkov M.A. *Elektroakustika* [Electroacoustics], Moscow: Svyaz', 1978, 272 p. (In Russ.)
- 

### **Systemansatz für den Aufbau von Software-Hardware - Komplexes für die Ausbildung der Fachkräfte zur Informationssicherheit**

**Zusammenfassung:** Um Spezialisten für Informationssicherheit (IS) auszubilden, ist ein Software- und Hardwarekomplex "Mittel zum Schutz von Informationen vor Leckagen über technische Kanäle" entwickelt, der die Möglichkeit bietet, den Prozess der Informationslecks über technische Kanäle und Methoden zu untersuchen sowie verschiedene Module und zusätzliche Software anzuwenden, die die Merkmale verschiedener Methoden der Informationssicherheit klar demonstrieren. Es ist die Zusammensetzung dieses Komplexes gezeigt: Laborstände, die akustische, vibroakustische, akustoelektrische Kanäle und einen Kanal von Nebenwirkungen elektromagnetischer Strahlung und Orientierungen modellieren. An jedem der Stände platzieren Informationssicherheitsmittel (SIS), die den Verlust vertraulicher Informationen über den entsprechenden technischen Kanal verhindern. Zur Einstellung der akustischen und vibroakustischen SIS-Kanäle ist ISIDORA-Software entwickelt, mit der der Pegel der erzeugten akustischen Interferenz angepasst werden kann, um die Anforderungen an die Sicherheit des Raums zu erfüllen und gleichzeitig ein angenehmes Gespräch in diesem Raum zu führen.

## **Une approche systémique de la construction d'un ensemble logiciel et matériel pour la formation des spécialistes de la sécurité de l'information**

**Résumé:** Dans le but de la formation des spécialistes de l'information de sécurité (IS) est élaboré un ensemble complexe de programmes et d'appareils «Moyens de la sécurité de l'information des fuites par les voies techniques», qui fournit l'occasion d'étudier le processus de la fuite de l'information par des canaux techniques et les mesures de sa protection ainsi que l'application d'une variété de modules et de logiciels supplémentaire (LS), illustrant les caractéristiques des différentes méthodes de IS. Est montrée la composition de ce complexe: bancs de laboratoire simulant les canaux acoustiques, vibroacoustiques, acousto-électriques et le canal de rayonnement électromagnétique secondaire et d'orientation. Des moyens de protection de l'information (MPI) sont installés sur chacun des stands pour empêcher la fuite d'informations confidentielles par le canal technique approprié. Est élaboré le logiciel "ISIDORA" permettant de régler le niveau de la fuite créée conforme aux exigences de la protection du local et assurant en même temps la communication confortable dans ce local.

---

**Авторы:** *Алексеев Владимир Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации»; *Гриднев Виктор Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Яковлев Алексей Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Машкова Оксана Сергеевна* – студент; *Савилова Ульяна Андреевна* – студент; *Шибков Денис Александрович* – студент; *Яковлева Дарья Алексеевна* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Дидрих Валерий Евгеньевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков

*Кафедра «Физика», phys@tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** кинетическая функция; математическая модель; мощность тепловыделений; нейронные сети; отверждение; полимерные композиты.

**Аннотация:** Рассмотрена возможность моделирования кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов (на примере углепластика) на основе применения искусственных нейронных сетей. С использованием нейросетевого моделирования получена зависимость изменения кинетической функции полимерного композита от степени отверждения. Проведено сравнение работоспособности нейронной сети с экспериментальными данными классическими методами аппроксимации.

---

### Введение

На сегодняшний день полимерные композиты (ПК) нашли применение во всех отраслях промышленности и современной техники, приходя на замену многим привычным для нас материалам. Качество изделий из ПК и эффективность производства в целом во многом обуславливаются оптимальностью температурно-временного режима отверждения ПК. Для проектирования оптимального процесса отверждения ПК на основе математической модели необходимо определить параметры модели процесса отверждения и материала, включая кинетические, реологические, теплофизические и другие характеристики ПК [1 – 7].

Известно множество различных математических моделей и методов для описания кинетики и определения кинетических характеристик процесса отверждения ПК, которые в основном определяют особенности химического процесса и не могут с одинаковой точностью описывать кинетику различных по химизму процессов, поэтому поиск и выбор адекватной модели кинетики отверждения требует высокой квалификации химика-технолога и много времени [6 – 10]. Для того чтобы упростить моделирование, предлагается использовать нейронные сети (НС), которые в настоящее время широко применяются для прогнозирования и аппроксимации во многих областях технических и гуманитарных наук [11].

Нейронные сети представляют собой самообучающиеся системы, позволяющие эффективно строить нелинейные зависимости, более точно описывающие наборы экспериментальных данных. Главным преимуществом нейросетевого моделирования является обучение и обобщение накопленной информации на основе выборки экспериментальных данных. Любая информация, загруженная в нейронную сеть в качестве входных и выходных сигналов, может представлять собой экспериментальные или расчетные данные [11]. Метод нейросетевого моделирования позволяет упростить моделирование кинетики отверждения, исключив подбор и поиск адекватной модели отверждения.

Цель работы – проверка возможности и целесообразности применения нейронной сети для прогнозирования кинетической функции  $\varphi(\beta)$  отверждения полимерного композита.

### Математическая модель кинетики отверждения полимерных композитов

Процесс исследования характеристик полимерных композитов необходимо организовывать так, чтобы в экспериментальном образце распределение температуры соответствовало температурному полю полубесконечной пластины, которое создается путем одностороннего нагрева образца плоской формы с тепловой изоляцией противоположной нагревателю стороны образца и его боковых сторон (рис. 1). При исследовании и производстве невозможно полностью исключить течение смолы препрега по направлению перпендикулярно градиента температуры в экспериментальной установке. Поэтому вводится допущение о течении смолы по изотерме и учитываются изменения толщины  $L$  и содержания связующего  $\gamma$  в исследуемом препреге ПК. Таким образом, для исследования характеристик образца будем использовать математическую модель горячего прессования [10].

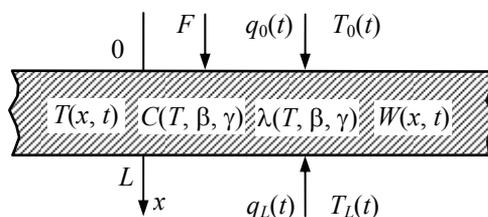


Рис. 1. Физическая модель процесса отверждения ПК

Для нахождения теплофизических и кинетических характеристик необходимо решить обратную задачу теплопроводности и кинетики для модели процесса, при решении которой, в качестве исходных данных, будем использовать температуру в образце  $T(x, t)$  и величины тепловых потоков  $q_0, q_L$  на поверхностях 0 и  $L$  исследуемого образца. В связи с этим при построении математической модели нагрева и отверждения ПК будут заданы граничные условия второго рода.

В указанных условиях математическая модель, описывающая процесс нагрева и отверждения полимерных композитов, аналогичная модели неограниченной пластины (см. рис. 1), представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений:

– переноса тепла с граничными условиями второго рода с изменяющейся под давлением толщиной  $L$  образца при наличии внутренних источников тепла:

$$C(T, \beta, \gamma) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T, \beta, \gamma) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \gamma(t) Q_{\text{п}} \frac{\partial \beta}{\partial t},$$

$$T \equiv T(x, t), \quad 0 < x < L(t), \quad 0 < t \leq t_{\text{к}}, \quad (1)$$

$$T(x, 0) = g_0(x), \quad 0 \leq x \leq L(0);$$

$$-\lambda(T, \beta, \gamma) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_0(t), \quad 0 < t \leq t_{\text{к}};$$

$$-\lambda(T, \beta, \gamma) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L(t)} = q_L(t), \quad 0 < t \leq t_{\text{к}}; \quad (2)$$

– кинетики отверждения

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \varphi(\beta) \exp\left(-\frac{E(\beta)}{RT}\right), \quad \beta < 1, \quad (3)$$

$$\beta \equiv \beta(x, t), \quad 0 \leq x \leq L(t), \quad 0 < t \leq t_k,$$

$$\beta(x, 0) = \beta_0(x), \quad 0 \leq x \leq L(0);$$

– прессования материала и течения связующего

$$L(t) = L(0) - L_{\text{в.св}}(t), \quad (4)$$

$$L_{\text{в.св}}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} \int_0^t \frac{dh_i(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (5)$$

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = -16 \frac{h_i^3(t)}{B\mu_i(t)l^3b} \frac{F}{l^3b}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad 0 < t \leq t_k; \quad (6)$$

$$h(0) = \frac{L(0)(\gamma_n - \gamma_k)}{(n-1)(1 - \gamma_k)}, \quad (7)$$

$$\mu_i(t) = \tilde{\mu}(\beta) \exp\left(\frac{E_\mu}{RT_i(t)}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad 0 < t \leq t_k, \quad (8)$$

$$\gamma(t) = \frac{L(t) - L(0)(1 - \gamma_n)}{L(t)}, \quad (9)$$

$$\gamma_n = \frac{\rho_{\text{пр}}(0) M_{\text{св}}(0)}{\rho_{\text{св}} M_{\text{пр}}(0)}, \quad (10)$$

$$\gamma_k = \frac{\rho_{\text{пр. min}} M_{\text{св. min}}}{\rho_{\text{св}} M_{\text{пр. min}}}, \quad (11)$$

где  $C$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T$  – температура, К;  $\beta$  – степень отверждения;  $\gamma$  – содержание связующего в препреге;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $t$  – время, с;  $x$  – пространственная координата, м;  $g$  – начальное распределение температуры, К;  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{п}}$  – полный тепловой эффект реакции отверждения, Дж/м<sup>3</sup>;  $t_k$  – время окончания процесса отверждения, с;  $E$  – энергия активации отверждения, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\varphi$  – кинетическая функция, с<sup>-1</sup>;  $B$  – коэффициент формы зазоров между слоями волокон;  $E_\mu$  – энергия активации вязкого течения, Дж/моль;  $h$  – толщина связующего между слоями препрега, м;  $l$ ,  $b$ ,  $L$  – длина, ширина и толщина образца соответственно, м;  $\mu$  – динамическая вязкость связующего, Па·с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>. Индексы: к – конечный; н – начальный; пр – препрег; св – связующее; в.св – вытекшее связующее из слоев препрега.

Исходя из предположения, что тепло, выделяемое связующим во время отверждения, пропорционально нарастанию степени отверждения, поэтому для определения кинетических характеристик, то есть энергии активации  $E(\beta)$  и кинетической функции отверждения  $\varphi(\beta)$ , используем мощность тепловыделений

$$W(x, t) = Q_{\text{п}} \frac{\partial \beta}{\partial t}. \quad (12)$$

Исследование кинетики проведем на тонких образцах ПК, толщина которых не превышает 5 мм. Для образцов малой толщины температуры на поверхностях и внутри образца практически не отличаются, тогда можно предположить, что скорости протекания реакции отверждения по всему объему исследуемого образца одинаковы и будем считать, что процесс отверждения по толщине протекает при среднеинтегральной температуре  $T_{cp}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x,t) dx$ , то есть

$$W(x,t) \equiv W(t). \quad (13)$$

Интегральное представление мощности тепловыделений в зависимости от времени находится непосредственно из уравнения (1) и имеет вид

$$W(t) = \frac{1}{\gamma(t)L(t)} \left[ q_L(t) - q_0(t) + \frac{d}{dt} \int_0^{L(t)} \int_{T(x,0)}^{T(x,t)} C(s, \beta, \gamma) ds dx \right]. \quad (14)$$

Источником информации о кинетике процесса является мощность тепловыделений, которая связана с кинетическим уравнением следующим образом:

$$\beta(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}, \quad 0 \leq \beta \leq 1, \quad (15)$$

где  $Q(t) = \int_0^t W(t) dt$  – тепловой эффект реакции отверждения, Дж/м<sup>3</sup>.

Учитывая допущения о среднеинтегральной температуре  $T_{cp}(t)$  по толщине образца, математическая модель кинетики примет вид:

$$\frac{d\beta}{dt} = \varphi(\beta) \exp\left(-\frac{E(\beta)}{RT_{cp}(t)}\right), \quad \beta < 1, \quad (16)$$

$$\beta \equiv \beta(t), \quad 0 < t \leq t_k, \quad \beta(0) = \beta_0.$$

Для дальнейшего моделирования и расчета процесса отверждения необходимо иметь значения параметров математической модели (1) – (11), которые можно определить экспериментально на основе физико-химических исследований процесса отверждения ПК или решив соответствующие обратные задачи. При решении обратной задачи кинетики для нахождения энергии активации  $E(\beta)$  и кинетической функции отверждения  $\varphi(\beta)$  будем использовать экспериментально измеренные и вычисленные значения степени отверждения  $\beta$ , соответствующей концентрации прореагировавших веществ. Подробное описание способов нахождения параметров математической модели (1) – (11) представлено в работах [10, 12]. Разработаны соответствующие методы и алгоритмы для определения теплофизических и кинетических характеристик, а также техническое оснащение [13].

Для расчета двух неизвестных характеристик  $E(\beta)$  и  $\varphi(\beta)$  из уравнения математической модели кинетики (16) необходимо составить систему из двух уравнений, описывающих различные условия процесса отверждения, то есть достаточно иметь данные о степени отверждения  $\beta(t)$ , полученные при отверждении одного и того же исследуемого материала по двум различным температурно-временным режимам  $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ .

Применив операцию логарифмирования к обеим частям уравнения (16) и используя временные зависимости  $\beta(t)$  и  $T_{cp}(t)$  двух различных по скорости нагрева экспериментов, составим систему двух линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $\ln\varphi(\beta)$  и  $E(\beta)$ , решая которую, находим кинетические характеристики процесса как функции степени отверждения:

$$E(\beta) = R \frac{\ln \frac{W_2(t(\beta))}{W_1(t(\beta))} T_{cp1}(t(\beta)) T_{cp2}(t(\beta))}{T_{cp2}(t(\beta)) - T_{cp1}(t(\beta))}; \quad (17)$$

$$\varphi(\beta) = \exp \left[ \frac{T_{cp2}(t(\beta)) \ln \frac{W_2(t(\beta))}{Q_n} - T_{cp1}(t(\beta)) \ln \frac{W_1(t(\beta))}{Q_n}}{T_{cp2}(t(\beta)) - T_{cp1}(t(\beta))} \right], \quad (18)$$

где  $W_1(t(\beta))$ ,  $W_2(t(\beta))$  – мощности тепловыделений в течение реакции отверждения в зависимости от времени и степени отверждения образцов для двух различных температурно-временных режимов отверждения;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_{cp1}(t(\beta))$ ,  $T_{cp2}(t(\beta))$  – среднеинтегральные температуры образцов при отверждении.

Как показал опыт исследования, полученные экспериментальные функции  $E(\beta)$  и  $\varphi(\beta)$  позволяют получать хорошие, устойчивые результаты только в средней части диапазона изменения степени отверждения, то есть в пределах  $0,2 < \beta < 0,8$ , где погрешность разностей среднеинтегральных температур невелика. При малых  $0 < \beta < 0,2$  и больших степенях отверждения  $0,8 < \beta < 1$  погрешности измерения температур  $T_{cp1}(t(\beta))$ ,  $T_{cp2}(t(\beta))$  становятся соизмеримыми с разностью данных температур, и функции  $E(\beta)$  и  $\varphi(\beta)$  определяются с достаточно большой погрешностью, имеют неустойчивость и не для всех материалов пригодны для расчетов.

Для дальнейшего использования при математическом моделировании полученных экспериментальных функций (17), (18) и адекватного моделирования кинетики процесса отверждения полимерного композита необходимо аппроксимировать кинетическую функцию  $\varphi(\beta)$  в пределах изменения степени отверждения  $\beta$  от 0 до 1 и энергию активации  $E(\beta)$ .

Кинетическую функцию  $\varphi(\beta)$  обычно аппроксимируют в виде одной из предложенных в работах [6, 7] и представленных в табл. 1 моделей 1 – 3. Кинетические параметры в них определяются с помощью нелинейной регрессии эмпирической автокаталитической модели, введенной Камалом в работе [6] (модель 2). Несмотря на то, что существуют более сложные механистические модели (модель 3), применимость данной кинетической модели для термореактивных связующих, которые следуют механизму свободно радикальной полимеризации, хорошо изучена и представлена в работе [7]. Автокаталитическая кинетическая модель связывает степень отверждения связующего  $\beta$  со скоростью полимеризации  $\frac{\partial \beta}{\partial t}$ . Предполагается, что константа скорости химической реакции  $K$  для этих выражений соответствует соотношению Аррениуса, как показано в уравнении (16). Порядки скорости химической реакции  $m$ ,  $n$  и константа скорости  $K$  определяются на основе экспериментально полученной функции  $\varphi(\beta)$  при отверждении образца, являются величинами, вычисленными для каждого отдельного вида ПК,

Модели аппроксимации кинетической функции

Модель 1	Модель 2	Модель 3
$\varphi(\beta) = K(1-\beta)^m$	$\varphi(\beta) = K\beta^n(1-\beta)^m$	$\varphi(\beta) = K(1-\beta)(1+k_0\beta)$
$K = 1,093 \cdot 10^6$	$K = 1,15 \cdot 10^6$	$K = 1,15 \cdot 10^6$
$m = 1,25$	$m = 1,26$	$k_0 = -0,66$
–	$n = 0,02$	–

и зависят от характера химической реакции процесса отверждения. Таким образом, имея в наличии три модели, возникает задача выбора наилучшей из них, которая будет соответствовать данному процессу отверждения ПК.

Энергия активации, например для углепластиков, как правило имеет слабую зависимость от степени отверждения и ее можно представить как константу  $E$ , и на основе средней части зависимости  $E(\beta)$ , где погрешность минимальная, находить среднее значение  $E$ , несмотря на то, что данное условие выполняется не для всех ПК.

### Построение нейронной сети для моделирования кинетики отверждения

Выбор и построение адекватной модели кинетической функции предлагается выполнять на основе нейронной сети. Для моделирования кинетической функции будем использовать массив экспериментальных данных в виде таблицы, содержащий расчетные зависимости изменения логарифма кинетической функции  $\varphi(\beta)$  от степени отверждения  $\beta$  по вышеприведенным формулам.

Для анализа данных применен метод нейросетевого моделирования путем построения трех различных типов нейронных сетей: по методам Левенберга–Марквардта, Байесовой регуляризации и масштабированному методу сопряженных градиентов. Моделирование проводилось в среде MATLAB с использованием плагина NEURON FITTING TOOLS, который позволяет задавать количество нейронов в скрытом слое, изменять процент обучающей, тестовой и проверочной выборок (рис. 2).

Нейронная сеть обучена с использованием алгоритмов «с учителем». Задано три вектора – входных значений (Inputs), целевой выходных значений (Outputs) и проверочный. В качестве входного вектора использовался экспериментальный массив данных по изменению степени отверждения полимерного композита в процессе отверждения; целевого параметра – значения кинетической функции, рассчитанные по моделям 1 – 3. Проверочным вектором выступали отобранные случайным образом 15 % от всех экспериментальных данных, которые не использовались при построении модели, а только для проверки адекватности работы НС.

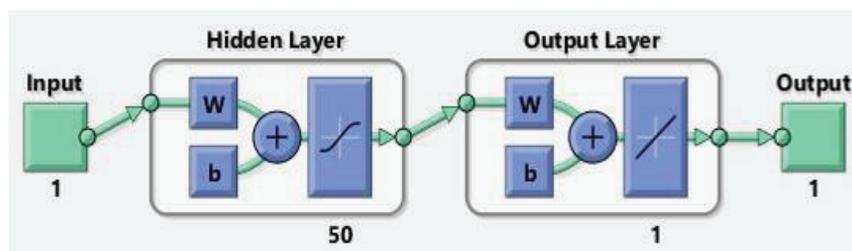


Рис. 2. Структурная схема нейронной сети

Для построения нейронной сети использовался каждый из доступных методов обучения. Число нейронов в скрытом слое задавали в количестве 50 шт., обучающая выборка составляла 70 %, тестовая и проверочная выборки – 15 %. Получены значения регрессии нейронной сети с использованием вышеприведенных алгоритмов, подтверждающие их работоспособность и производительность. В результате анализа графиков регрессии НС трех различных типов сделан вывод, что наибольшая производительность НС достигается при обучении сети по методу Байесовой регуляризации (рис. 3).

Для дальнейшего компьютерного моделирования будем использовать данный метод. В процессе моделирования осуществлен полный перебор значений степени отверждения  $\beta$  от 0 до 1 с шагом 0,01. По результатам моделирования получена зависимость логарифма кинетической функции  $\ln \varphi(\beta)$  от степени отверждения  $\beta$  (рис. 4) и вычислены значения кинетической функции  $\varphi(\beta)$ .

При сравнении с экспериментально полученными данными оказалось, что НС достаточно точно прогнозирует изменение значений кинетической функции от степени отверждения при  $\beta > 0,1$ . Расхождение результатов моделирования и эксперимента на данном участке связано с большими погрешностями при экспериментальном определении мощности тепловыделений на начальном этапе эксперимента. Для сравнения результатов работы нейронной сети и численных методов расчета по моделям 1 – 3 составлена табл. 2.

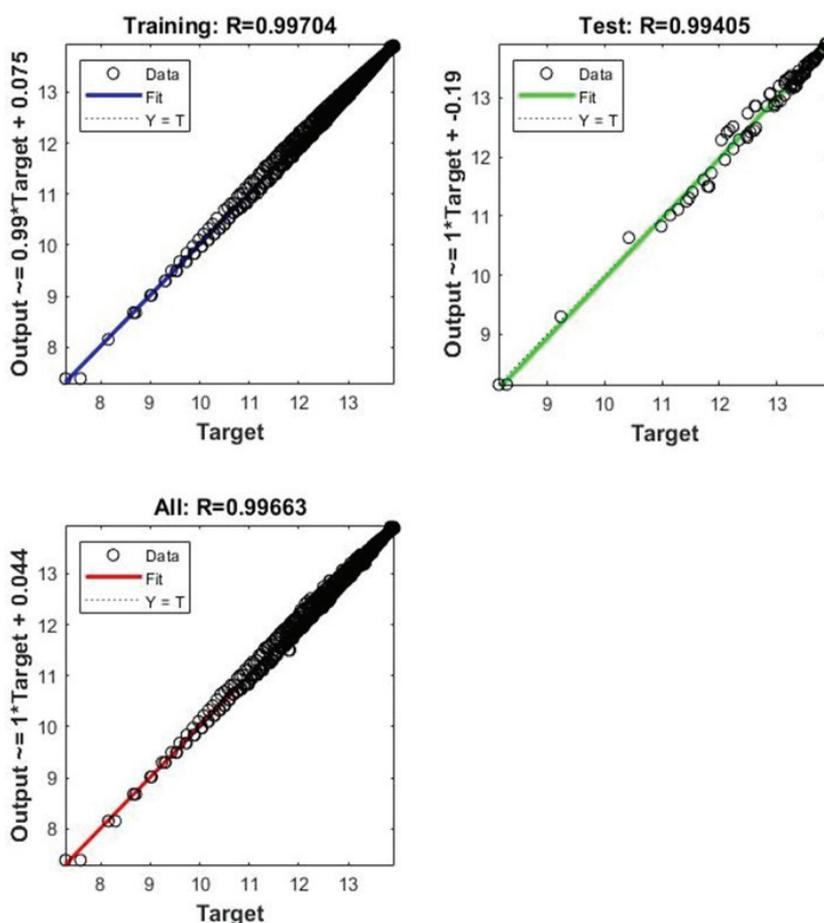
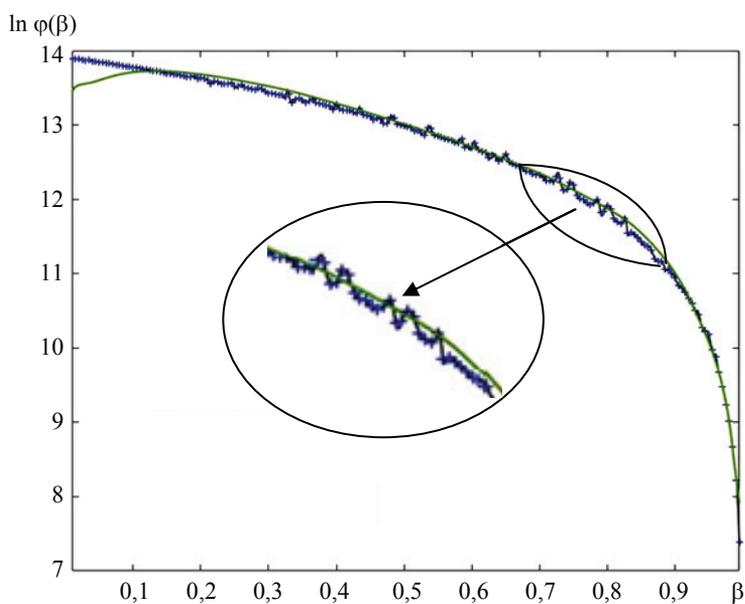


Рис. 3. Графики регрессии нейронной сети



**Рис. 4. Результаты моделирования кинетической функции:**  
 + – выходные значения; — – аппроксимирующая кривая НС;  
 — — экспериментальная кривая

Таблица 2

**Сравнение результатов моделирования кинетической функции  $\ln\phi(\beta)$**

Степень отверждения $\beta$	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Нейронная сеть	Эксперимент
0,003	13,84	13,95	13,85	13,90	13,53
0,017	13,85	13,93	13,88	13,88	13,54
0,164	13,69	13,66	13,68	13,68	13,72
0,251	13,56	13,48	13,53	13,54	13,61
0,347	13,39	13,27	13,34	13,37	13,45
0,467	13,15	12,96	13,06	13,12	13,14
0,642	12,65	12,38	12,56	12,62	12,61
0,743	12,24	11,92	12,13	12,21	12,16
0,835	11,69	11,36	11,71	11,66	11,74
0,967	9,66	9,53	9,64	9,65	9,71

Для наглядного сравнения погрешности вычисления кинетической функции по каждой из моделей, найдем методическую среднеквадратичную погрешность, рассчитанную на основе прогнозируемых данных по каждому из методов и экспериментальным данным. Для вычисления среднеквадратичной погрешности рассчитано значение кинетики отверждения при изменении  $\beta$  от 0,1 до 0,9 с шагом 0,01. Данный диапазон изменения степени отверждения выбран для минимизации влияния погрешности экспериментальных измерений на точность сравнения представленных методов

Модель	1	2	3	Нейронная сеть
Погрешность	0,0049	0,0404	0,0045	0,0036

Наименьшее значение среднеквадратичной погрешности модели достигается при использовании нейронной сети. Таким образом, ее применение в процессе нахождения кинетических характеристик отверждения полимерных композитов оправдано, а также повышает точность аппроксимации кинетической функции.

### Выводы

В результате выполнения данной работы создана НС, позволяющая моделировать кинетическую функцию углепластика в процессе его отверждения в пределах изменения  $\beta$  от 0 до 1, что подтвердило возможность и целесообразность использования НС для моделирования процесса отверждения полимерных композитов. Однако для функционирования НС требуется определять эмпирические параметры моделей кинетики, поэтому актуальна дальнейшая разработка системы обработки экспериментальных данных на основе НС, которая позволит находить в автоматическом режиме все необходимые кинетические характеристики процесса отверждения только на основе экспериментальных данных, без выполнения промежуточных вычислений и выбора подходящих аппроксимирующих моделей.

#### *Список литературы*

1. Optimal Curing for Thermoset Matrix Composites: Thermochemical Considerations / M. Li, Q. Zhu, P. H. Geubelle, Ch. L. Tucker // *Polymer Composites*. – 2001. – Vol. 22, No. 1. – P. 118 – 131. doi: 10.1002/pc.10524
2. Optimal Cure Cycle Parameters for Minimizing Residual Stresses in Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminates / P. H. Shah, V. A. Halls, J. Q. Zheng, R. C. Batra // *Journal of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 52, No. 6. – P. 773 – 792. doi: 10.1177/0021998317714317
3. Struzziero, G. Numerical Optimisation of Thermoset Composites Manufacturing Processes: A review / G. Struzziero, J. J. E. Teuwen, A. A. Skordos // *Composites Part A. Science and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 124. – Art. 105499. doi:10.1016/j.compositesa.2019.105499
4. Optimization of Curing Cycles Products of the Polymer Composite Materials on Base of Glutinous Prepregs / O. S. Dmitriev, S. V. Mischenko, S. O. Dmitriev, V. N. Kirillov // *Polymer Science, Series D*. – 2009. – Vol. 2, No. 4. – P. 223 – 229. doi: 10.1134/S1995421209040078
5. The Structure and Properties of Fluoroplastic Modified with Titanium Nanoparticles / G. S. Baronin, V. M. Buznik, O. S. Dmitriev [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1915, Issue 1. – P. 040002-1 – 040002-4. doi: 10.1063/1.5017350
6. Kamal, M. R. Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure / M. R. Kamal, S. Sourour // *Polymer Engineering and Science*. – 1973. – Vol. 13, No. 1. – P. 59 – 64.
7. Lee, J. H. Kinetic Parameters Estimation for Cure Reaction of Epoxy Based Vinyl Ester Resin / J. H. Lee, J. W. Lee // *Polymer Engineering and Science*. – 1994. – Vol. 34, No. 9. – P. 742 – 749.
8. Effect of Cure Kinetic Simulation Model on Optimized Thermal Cure Cycle for Thin-Sectioned Composite Parts / M. Vafayan, H. Abedini, M. H. R Ghreishy, M. H. Beheshty // *Polymer Composites*. – 2013. – Vol. 34, No. 7. – P. 1172 – 1179. doi: 10.1002/pc.22526
9. Kumar, K. V. Root Cause Analysis of Heating Rate Deviations in Autoclave Curing of CFRP Structures / K. V. Kumar, M. Safiullah, A. N. K. Ahmed // *International Journal of Innovative Research and Studies*. – 2013. – Vol. 2, No. 5. – P. 369 – 378.
10. Мищенко, С. В. Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, С. В. Пономарев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 390 – 399.

11. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. Н. Н. Кукуль, А. Ю. Шелестова. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.

12. Dmitriev, O. S. Numerical-Analytical Solution of the Nonlinear Coefficient Inverse Heat Conduction Problem / O. S. Dmitriev, A. A. Zhivenkova // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – Vol. 91, No. 6. – P. 1353 – 1364. doi: 10.1007/s10891-018-1869-x

13. Computer-Measuring System for Research into Properties of Glutinous Prepregs and Calculation of Curing Cycles of the Polymer Composite Materials on Their Base / O. S. Dmitriev, V. N. Kirillov, S. V. Mischenko, A. O. Dmitriev // *Polymer Science, Series D*. – 2010. – Vol. 3, No. 1. – P. 20 – 25. doi: 10.1134/S199542121001003X

---

## Modeling the Kinetic Characteristics of the Curing Process of Polymer Composites Based on a Neural Network

O. S. Dmitriev, A. A. Barsukov

*Department of Physics, phys@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** kinetic function; mathematical model; heat release power; neural networks; curing; polymer composites.

**Abstract:** The article considers the possibility of modeling the kinetic characteristics of the curing process of polymer composites (for example, carbon fiber reinforced plastic) based on the use of artificial neural networks. Using neural network modeling, the dependence of the change in the kinetic function of the polymer composite on the degree of cure has been obtained. The performance of the neural network is compared with experimental data using classical approximation methods.

### References

1. Li M., Zhu Q., Geubelle P.H., Tucker Ch.L. Optimal Curing for Thermoset Matrix Composites: Thermochemical Considerations, *Polymer Composites*, 2001, vol. 22, no. 1, pp. 118-131, doi: 10.1002/pc.10524

2. Shah P.H., Halls V.A., Zheng J.Q., Batra R.C. Optimal Cure Cycle Parameters for Minimizing Residual Stresses in Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminates, *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 52, no. 6, pp. 773-792, doi: 10.1177/0021998317714317

3. Struzziero G., Teuwen J.J.E., Skordos A.A. Numerical Optimisation of Thermoset Composites Manufacturing Processes: A Review, *Composites Part A. Science and Manufacturing*, 2019, vol. 124, art. 105499, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105499

4. Dmitriev O.S., Mischenko S.V., Dmitriev S.O., Kirillov V.N. Optimization of Curing Cycles Products of the Polymer Composite Materials on Base of Glutinous Prepregs, *Polymer Science, Series D*, 2009, vol. 2, no. 4, pp. 223-229, doi: 10.1134/S1995421209040078

5. Baronin G.S., Buznik V.M., Dmitriev O.S., Zavrazhina C.V., Mishchenko S.V., Zavrazhin D.O., Khudyakov V.V. The Structure and Properties of Fluoroplastic Modified with Titanium Nanoparticles, *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, issue 1, pp. 040002-1 - 040002-4, doi: 10.1063/1.5017350

6. Kamal M.R., Sourour S. Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure, *Polymer Engineering and Science*, 1973, vol. 13, no. 1, pp. 59-64.

7. Lee J.H., Lee J.W. Kinetic Parameters Estimation for Cure Reaction of Epoxy Based Vinyl Ester Resin, *Polymer Engineering and Science*, 1994, vol. 34, no. 9, pp. 742-749.

8. Vafayan M., Abedini H., Ghoreishy M.H.R., Beheshty M.H. Effect of Cure Kinetic Simulation Model on Optimized Thermal Cure Cycle for Thin-Sectioned Composite Parts, *Polymer Composites*, 2013, vol. 34, no. 7, pp. 1172-1179, doi: 10.1002/pc.22526

9. Kumar K.V., Safiullah M., Ahmad A.N.K. Root Cause Analysis of Heating Rate Deviations in Autoclave Curing of CFRP Structures, *International Journal of Innovative Research and Studies*, 2013, vol. 2, no. 5, pp. 369-378.

10. Mishchenko S.V., Dmitriev O.S., Ponomarev S.V. [Mathematical modeling of curing process of polymer composite material products by hot pressing method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1998, vol. 4, no. 4, pp. 390-399. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Haykin S. *Neyronnyye seti. Polnyy kurs* [Neural networks. Full course], Moscow: Vil'yams, 2006, 1104 p. (In Russ.)

12. Dmitriev O.S., Zhivenkova A.A. Numerical-Analytical Solution of the Nonlinear Coefficient Inverse Heat Conduction Problem, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 6, pp. 1353-1364, doi: 10.1007/s10891-018-1869-x

13. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Mischenko S.V., Dmitriev A.O. Computer-Measuring System for Research into Properties of Glutinous Prepregs and Calculation of Curing Cycles of the Polymer Composite Materials on Their Base, *Polymer Science, Series D*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 20-25, doi: 10.1134/S199542121001003X

---

### **Modellierung kinetischer Eigenschaften des Aushärtungsprozesses von Polymerverbundwerkstoffen auf dem neuronalen Netzwerk**

**Zusammenfassung:** Es ist die Möglichkeit betrachtet, die kinetischen Eigenschaften des Härtingsprozesses von Polymerverbundwerkstoffen (am Beispiel des kohlefaserverstärkten Kunststoffs) auf der Grundlage der Anwendung der künstlichen neuronalen Netze zu modellieren. Unter Verwendung der neuronalen Netzwerkmodellierung ist die Abhängigkeit der Änderung der kinetischen Funktion des Polymerverbundstoffs vom Härtingsgrad erhalten. Die Leistung des neuronalen Netzwerks ist mit experimentellen Daten unter Verwendung klassischer Approximationsmethoden verglichen.

---

### **Modélisation des caractéristiques cinétiques du processus du durcissement des composites polymères à partir d'un réseau neuronal**

**Résumé:** Est envisagée la possibilité de modéliser les caractéristiques cinétiques du processus du durcissement des composites polymères (à l'exemple de la fibre de carbone) à la base de l'utilisation des réseaux neuronaux artificiels. Avec l'utilisation de la simulation du réseau neuronal est obtenue une dépendance du changement de la fonction cinétique du composite polymère du degré du durcissement. La performance du réseau neuronal a été comparée aux données expérimentales par des méthodes classiques d'approximation.

---

**Авторы:** *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»; *Барсуков Александр Андреевич* – аспирант кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Грибков Алексей Николаевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АТЕРОСКЛЕРОТИЧЕСКИХ БЛЯШЕК НА СТЕНКАХ СОСУДОВ МЕТОДАМИ ИНТРАВАСКУЛЯРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, Т. А. Фролова, С. Г. Проскурин

*Кафедра «Биомедицинская техника», bmt@istu.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** атеросклеротические бляшки; биомеханические свойства; внутрисосудистые применения; глубина когерентного зондирования; оптическая когерентная томография; пульсовая волна; сегментация изображения; церебральная аневризма.

**Аннотация:** Предложен метод исследования атеросклеротических бляшек на стенках крупных кровеносных сосудов, который позволяет учитывать не только оптические, но и механические свойства исследуемого объекта. Отмечены его главные особенности. Сведения о геометрических характеристиках и внутренней структуре атеросклеротических бляшек могут быть полезны для определения их стабильности. Данный метод предполагается использовать не только при проведении научных исследований, но и в реальной клинической практике, в частности нейрохирургических задачах для оценки степени влияния атеросклероза на церебральную аневризму.

---

### Введение

Атеросклероз является наиболее распространенной формой «артериосклероза». Термин «артериосклероз» при дословном переводе означает «затвердевание артерии», в медицине ассоциируется с ситуацией утолщения артериальной стенки и потери эластичности кровеносного сосуда [1].

Атеросклероз – в первую очередь поражение внутренней оболочки кровеносного сосуда, то есть интимы. Причем области атеросклеротического поражения практически всегда выступают в просвет кровеносного сосуда. Выступающую часть обычно называют атеросклеротической бляшкой. Опасность атеросклеротической бляшки заключается:

- в механическом препятствии кровотоку вследствие снижения внутреннего просвета кровеносного сосуда;
- значительной вероятности отрыва части атеросклеротической бляшки с последующей закупоркой кровеносного сосуда;
- ослаблении стенки кровеносного сосуда с последующим образованием аневризмы.

Вышеперечисленные факторы позволяют косвенно ассоциировать атеросклероз со смертностью от инфаркта или инсульта, что делает его одним из наиболее опасных патологических состояний.

Медико-техническая база для диагностики атеросклероза недостаточно развита [2]. Пространственное разрешение систем компьютерной и магнитно-резонансной ангиографии позволяет фиксировать наличие и примерную геометрию относительно крупных атеросклеротических бляшек. Интраваскулярные УЗИ-зонды также не отличаются высоким пространственным разрешением и позволяют оценивать геометрию, а главное состав атеросклеротических бляшек лишь приближенно. Биопсия атеросклеротических бляшек имеет высокую информативность, но довольно опасна. Прогнозы по развитию атеросклероза в медицине чаще всего делают на основе анализа факторов риска (возраста, пола, генетической предрасположенности, сахарного диабета, курения, повышенного уровня холестерина, артериальной гипертензии и т.п.).

Цель проводимых исследований – создание метода оценки геометрических характеристик и состава атеросклеротических бляшек на основе сочетания интраваскулярной оптической когерентной томографии (ОКТ) [3, 4] и компрессионной эластографии.

### Материалы и методы

Последовательность действий по оценке геометрических характеристик и идентификации структурных составляющих схематично показана на рис. 1.

Первым действием в составе представленного метода является считывание исходных данных. В частности, проводится получение массивов структурных изображений интраваскулярной ОКТ, а также актуальных сведений о кровяном давлении и скорости кровотока в исследуемом участке кровеносного сосуда.

Последовательность структурных ОКТ-изображений подвергается анализу с учетом величины систолического и диастолического артериального давления. Первое и второе структурные ОКТ-изображения выделяются из последовательности, при этом первое соответствует моменту диастолы в исследуемом сосуде, а второе – моменту систолы [5]. Данные ОКТ-изображения подвергаются цветовой сегментации по методу водоразделов, который чувствителен к шумам, поэтому для снижения количества ложных срабатываний оба ОКТ-изображения предварительно очищаются от шумов. Маркеры на обрабатываемых изображениях могут использоваться в качестве альтернативы предварительной обработке.

Сегменты подвергаются группировке на основе сходства в интенсивности сигнала, яркости и текстуре. Объединенные сегменты по сути становятся пространственными аналогами структур исследуемого биообъекта или его фантома [6].

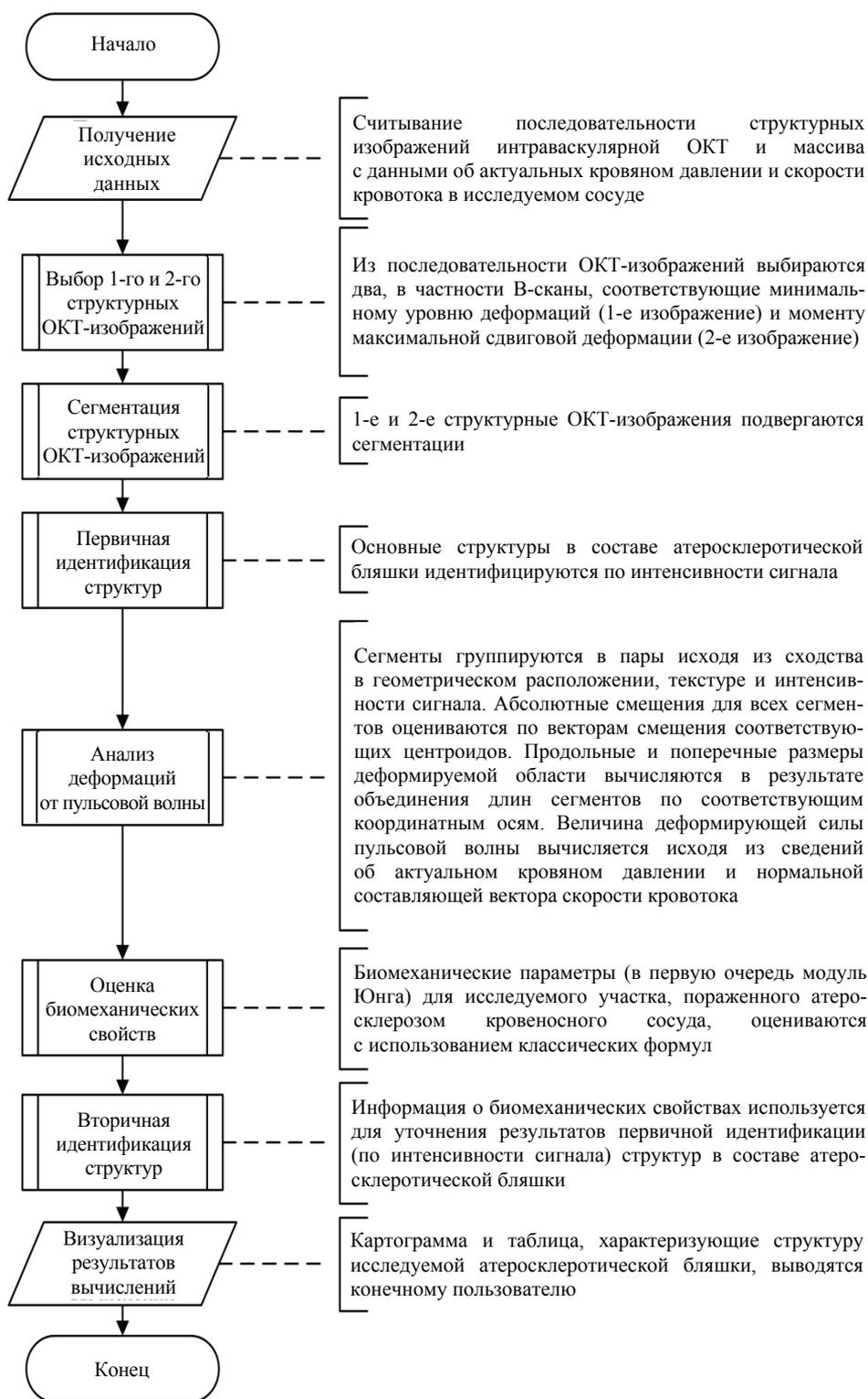
Центроиды вычисляются для каждого из объединенных сегментов. Абсолютные смещения структур исследуемого объекта (ОКТ-изображение в момент систолы относительно ОКТ-изображения в момент диастолы) находятся по смещениям вышеуказанных центроидов.

Посредством учета длин проекций векторов смещений на соответствующие координатные оси вычисляются продольные и поперечные размеры деформируемой области.

Величина деформирующей силы рассчитывается для множества точек в составе анализируемых ОКТ-изображений на основе сведений о разности кровяного давления в исследуемом сосуде. Модуль Юнга определяется по формуле

$$E \approx \frac{k_{\text{norm}} P_{PLS} l}{\Delta l},$$

где  $k_{\text{norm}}$  – коэффициент нормальной составляющей деформирующей силы пульсовой волны,  $k_{\text{norm}} = \frac{v_{\text{norm}}}{|\vec{v}|}$ ,  $v_{\text{norm}}$  – компонента вышеуказанного вектора, направленная по нормали к исследуемой поверхности,  $\vec{v}$  – вектор скорости потока



**Рис. 1. Ключевые этапы алгоритма оценки геометрических характеристик и внутренней структуры атеросклеротической бляшки**

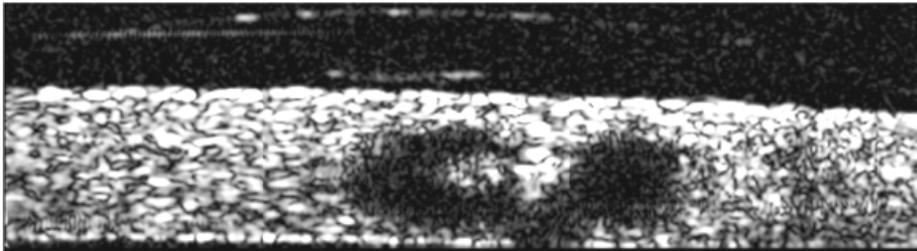
крови в исследуемом участке кровеносного сосуда;  $P_{PLS}$  – кровяное давление,  $P_{PLS} = P_{SYS} - P_{DIA}$ ;  $P_{SYS}$ ,  $P_{DIA}$  – систолическое и диастолическое давление соответственно;  $l$  – продольные размеры деформируемой области;  $\Delta l$  – продольные смещения.

Границы сегментов исследуемого биообъекта уточняются с использованием полученных сведений о величине модуля Юнга. Идентифицированные структуры ставятся в соответствие анатомическим структурам исследуемого биообъекта [7]. Результаты вычислений сохраняются. Картограмма, характеризующая строение и геометрию атеросклеротической бляшки, визуализируется [8].

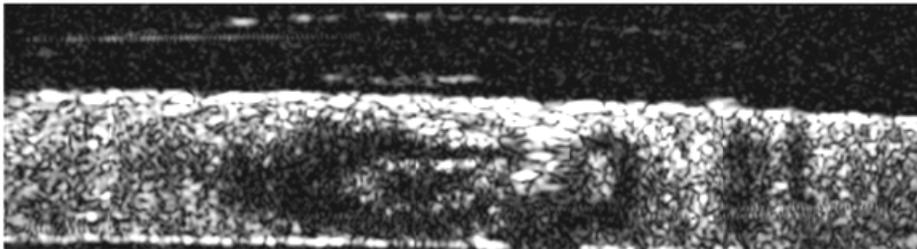
### Результаты и обсуждение

Представленный метод оценки геометрических характеристик и внутреннего строения атеросклеротических бляшек реализован практически в среде LabVIEW [5, 9]. Тестирование метода осуществлено с использованием гидродинамических фантомов. Примеры структурных ОКТ-изображений до обработки показаны на рис. 2.

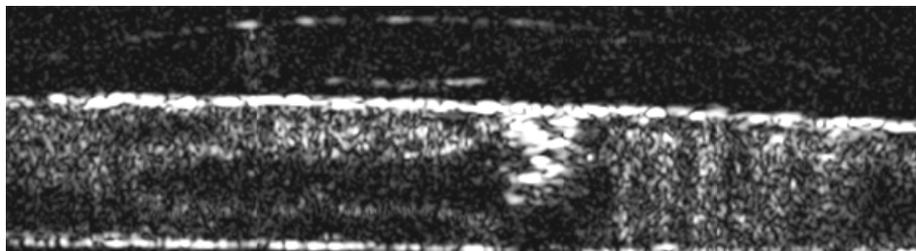
Гидродинамический фантом представляет собой полую трубку, напечатанную на 3D-принтере из фотополимера [9]. Для имитации атеросклеротической бляшки на часть внутренней поверхности фантома нанесен двухкомпонентный прозрачный



а)

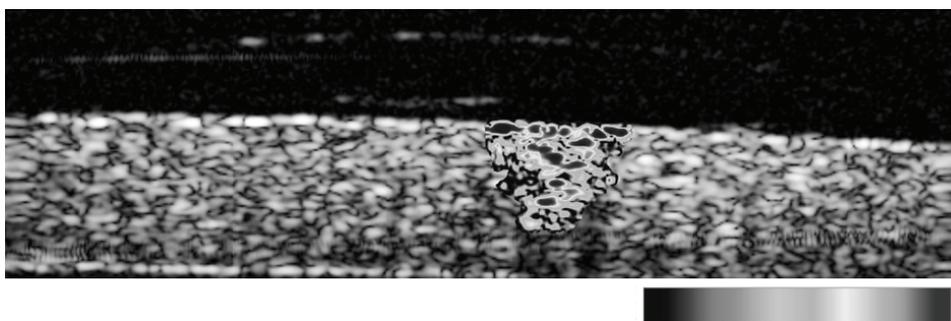


б)



в)

**Рис. 2. Структурные изображения турбулентностей в потоке кровенемитирующей жидкости, вызванных атеросклеротической бляшкой, при скорости потока, мм/с: а – 25; б – 50; в – 75**



**Рис. 3. Результат идентификации атеросклеротической бляшки по предложенному методу**

силикон со специальными добавками [10]. Для нанесения состава применялась иголка с широким наконечником. Мелкодисперсные порошки диоксида титана  $TiO_2$  и спектрального красителя «Indian Ink» использованы соответственно в качестве рассеивающих и поглощающих добавок. В качестве кровеимитирующей жидкости брали взвесь из частиц диоксида титана в воде [3, 6].

Пример идентификации атеросклеротической бляшки в фантоме кровеносного сосуда показан на рис. 3. Дополнительная цветовая шкала применена для характеристики состава атеросклеротической бляшки. В конкретном примере градации серого цвета показывают области с однотипной концентрацией специальных добавок [11].

Рассмотрим сильные и слабые стороны предложенного метода. Двухступенчатая идентификация структур в составе атеросклеротической бляшки позволяет добиться высокой точности получаемых результатов. В рассмотренном примере геометрию бляшки удалось описать с достоверностью выше 95 %. Методы-аналоги, как правило, базируются на анализе только оптических свойств исследуемого биообъекта или его фантома, поэтому дают более низкую эффективность. Быстродействие в методах интраваскулярной диагностики ключевой роли не играет, так как процесс проведения зонда через артерии является довольно опасным. Экономия времени ценой повышения вероятности случайного повреждения сосуда неприемлема. В рассмотренном примере анализ данных (без учета времени на доставку зонда и сканирование) осуществлен менее чем за 0,72 секунды. Пульсовая волна используется в качестве единственного деформирующего воздействия, что повышает безопасность предложенного метода. В качестве основного недостатка следует отметить невысокую глубину когерентного зондирования исследуемого биообъекта [12].

### **Заключение**

Предложен оригинальный подход к оценке геометрии и внутреннего состава атеросклеротических бляшек. Метод позволяет учитывать не только оптические, но и механические свойства исследуемого объекта.

Главные особенности предложенного метода:

- предварительная идентификация структур атеросклеротической бляшки на основе цветовой сегментации по алгоритму водоразделов;
- уточнение полученных данных с использованием результатов компрессионной эластографии;
- использование пульсовой волны в качестве единственного деформирующего воздействия;
- использование сведений о скорости кровотока и величине кровяного давления для расчета величины деформирующей силы и площади ее воздействия;
- расчет продольных и поперечных размеров деформируемой области, а также абсолютных смещений посредством разложения по координатным осям векторов смещения центроидов для всех анализируемых сегментов.

Данный метод может быть использован не только при проведении научных исследований, но и в реальной клинической практике, в частности нейрохирургических задачах для оценки степени влияния атеросклероза на церебральную аневризму [13].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-10327).*

#### *Список литературы*

1. Intravascular Atherosclerotic Imaging with Combined Fluorescence and Optical Coherence Tomography Probe Based on a Double-Clad Fiber Combiner / S. Liang, C. Sun, A. Saidi [et. al] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2012. – Vol. 17 (7). – P. 070501.
2. Frolova, M. S. Regulations on Medical Devices in Different Countries / M. S. Frolova, S. V. Frolov, I. A. Tolstukhin // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 726 – 733.
3. Recent Progress in Tissue Optical Clearing for Spectroscopic Application / A. Yu. Sdobnov, M. E. Darvin, E. A. Genina [et. al] // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 197. – P. 216 – 229.
4. Compression Elastography and Endoscopic Optical Coherence Tomography for Biomechanical Properties Evaluation of Cerebral Arteries Walls with Aneurysm and their Phantoms / S. V. Frolov, A. Yu. Potlov, T. A. Frolova, S. G. Proskurin // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2140. – P. 020020.
5. Potlov, A. Yu. Numerical Simulation of Photon Migration in Homogeneous and Inhomogeneous Cylindrical Phantoms / A. Yu. Potlov, S. V. Frolov, S. G. Proskurin // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128. – P. 835 – 842.
6. Bashkatov, A. N. Optical Properties of Skin, Subcutaneous, and Muscle Tissues: a Review / A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. V. Tuchin // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. – 2011. – Vol. 4, No. 1. – P. 9 – 38.
7. Frolov, S. V. An Endoscopic Optical Coherence Tomography System with Improved Precision of Probe Positioning / S. V. Frolov, A. Yu. Potlov // *Biomedical Engineering*. – 2019. – Vol. 53 (1). – P. 6 – 10.
8. Localized Compliance Measurement of the Airway Wall Using Anatomic Optical Coherence Elastography / R. Bu, S. Balakrishnan, H. Price [et al.] // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, No. 12. – P. 16751 – 16766.
9. High-Precision Evaluation of Stress-Related Properties of Blood Vessel Walls Using In-Travascular Optical Coherence Elastography with Forward-View Probe / A. Yu. Potlov, S. V. Frolov, T. A. Frolova, S. G. Proskurin // *Progress in Biomedical Optics and Imaging (Proceedings of SPIE)*. – 2020. – Vol. 11457, art. No. 11457 1P.
10. Photoacoustic Oximetry Imaging Performance Evaluation Using Dynamic Blood Flow Phantoms with Tunable Oxygen Saturation / W. C. Vogt, X. Zhou, R. Andriani [et al.] // *Biomedical Optics Express*. – 2019. – Vol. 10, No. 2. – P. 449 – 464.
11. Wang, R. K. Doppler Optical Micro-Angiography for Volumetric Imaging of Vascular Perfusion in vivo / R. K. Wang, L. An // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17, No. 11. – P. 8926 – 8940.
12. Common-Path Phase-Sensitive Optical Coherence Tomography Provides Enhanced Phase Stability and Detection Sensitivity for Dynamic Elastography / G. Lan, M. Singh, K. V. Larin, M. D. Twa // *Biomedical Optics Express*. – 2017. – Vol. 8, No. 11. – P. 5253 – 5266.
13. Sindeev, S. V. Mathematical Modeling of Hemody-Namics in Patient-Specific Model of Cerebral Aneurysm / S. V. Sindeev, S. V. Frolov, J. S. Bauer // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 424 – 428. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.424-428

# The Study of Geometry and Mechanical Properties of Atherosclerotic Plaques on Vessel Walls by Intravascular Optical Coherent Tomography

S. V. Frolov, A. Yu. Potlov, T. A. Frolova, S. G. Proskurin

*Department of Biomedical Engineering,  
bmt@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** atherosclerotic plaques; biomechanical properties; intravascular applications; coherent sounding depth; optical coherence tomography; pulse wave; image segmentation; cerebral aneurysm.

**Abstract:** A method for studying atherosclerotic plaques on the walls of large blood vessels is proposed, which allows taking into account not only the optical, but also the mechanical properties of the object under study. Its main features are noted. The information about the geometric characteristics and internal structure of atherosclerotic plaques can be useful in determining their stability. This method is supposed to be used not only in scientific research, but also in real clinical practice, in particular, neurosurgical problems to assess the degree of influence of atherosclerosis on cerebral aneurysm.

## References

1. Liang S., Sun C., Saidi A. [et. al] Intravascular Atherosclerotic Imaging with Combined Fluorescence and Optical Coherence Tomography Probe Based on a Double-Clad Fiber Combiner, *Journal of Biomedical Optics*, 2012, vol. 17 (7), p. 070501.
2. Frolova M.S., Frolov S.V., Tolstukhin I.A. Regulations on Medical Devices in Different Countries, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 726-733. (In Eng., abstract in Russ.)
3. Sdobnov A.Yu., Darvin M.E., Genina E.A., Bashkatov A.N., Lademann J., Tuchin V.V. Recent Progress in Tissue Optical Clearing for Spectroscopic Application, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, vol. 197, pp. 216-229.
4. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Frolova T.A., Proskurin S.G. Compression Elastography and Endoscopic Optical Coherence Tomography for Biomechanical Properties Evaluation of Cerebral Arteries Walls with Aneurysm and their Phantoms, *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2140, p. 020020.
5. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. Numerical Simulation of Photon Migration in Homogeneous and Inhomogeneous Cylindrical Phantoms, *Optics and Spectroscopy*, 2020, vol. 128, pp. 835-842.
6. Bashkatov A.N., Genina E.A., Tuchin V.V. Optical Properties of Skin, Subcutaneous, and Muscle Tissues: a Review, *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 9-38.
7. Frolov S.V., Potlov A.Yu. An Endoscopic Optical Coherence Tomography System with Improved Precision of Probe Positioning, *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53 (1), pp. 6-10.
8. Bu R., Balakrishnan S., Price H., Zdanski C., Mitran S., Oldenburg A.L. Localized Compliance Measurement of the Airway Wall Using Anatomic Optical Coherence Elastography, *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 12, pp. 16751-16766.
9. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Frolova T.A., Proskurin S.G. High-Precision Evaluation of Stress-Related Properties of Blood Vessel Walls Using In-Travascular Optical Coherence Elastography with Forward-View Probe, *Progress in Biomedical Optics and Imaging (Proceedings of SPIE)*, 2020, vol. 11457, art. no. 11457 1P.
10. Vogt W.C., Zhou X., Andriani R., Wear K.A., Pfefer T.J., Garra B.S. Photoacoustic Oximetry Imaging Performance Evaluation Using Dynamic Blood Flow Phantoms with Tunable Oxygen Saturation, *Biomedical Optics Express*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 449-464.

11. Wang R.K., An L. Doppler Optical Micro-Angiography for Volumetric Imaging of Vascular Perfusion in vivo, *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 11, pp. 8926-8940.

12. Lan G., Singh M., Larin K.V., Twa M.D. Common-Path Phase-Sensitive Optical Coherence Tomography Provides Enhanced Phase Stability and Detection Sensitivity for Dynamic Elastography, *Biomedical Optics Express*, 2017, vol. 8, no. 11, pp. 5253-5266.

13. Sindeev S.V., Frolov S.V., Bauer J.S. Mathematical Modeling of Hemodynamics in Patient-Specific Model of Cerebral Aneurysm, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 424-428, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.424-428 (In Eng., abstract in Russ.)

---

### **Untersuchung der Geometrie und der mechanischen Eigenschaften von atherosklerotischen Plaques an den Wänden von Blutgefäßen durch intravaskuläre optische Kohärenztomographie**

**Zusammenfassung:** Es ist eine Methode zur Untersuchung atherosklerotischer Plaques an den Wänden großer Blutgefäße vorgeschlagen, mit der nicht nur die optischen, sondern auch die mechanischen Eigenschaften des untersuchten Objekts berücksichtigt werden können. Es sind ihre Hauptmerkmale markiert. Informationen über die geometrischen Eigenschaften und die innere Struktur von atherosklerotischen Plaques können bei der Bestimmung ihrer Stabilität hilfreich sein. Diese Methode soll nicht nur in der wissenschaftlichen Forschung eingesetzt werden, sondern auch in der realen klinischen Praxis, insbesondere bei neurochirurgischen Aufgaben, um den Grad des Einflusses von Atherosklerose auf das zerebrale Aneurysma zu bewerten.

---

### **Étude de la géométrie et des propriétés mécaniques des plaques d'athérosclérose sur les parois vasculaires par la tomographie par cohérence optique intravasculaire**

**Résumé:** Est proposée une méthode d'étude des plaques athérosclérotiques sur les parois des gros vaisseaux sanguins, qui permet de prendre en compte non seulement les propriétés optiques mais aussi celles mécaniques de l'objet étudié. Sont marquées ses principales caractéristiques. Des informations sur les caractéristiques géométriques et la structure interne des plaques athérosclérotiques peuvent être utiles pour déterminer leur stabilité. Cette méthode peut être utilisée non seulement dans la recherche scientifique, mais aussi dans la pratique clinique réelle, en particulier pour résoudre les tâches neurochirurgicales pour évaluer le degré d'influence de l'athérosclérose sur l'anévrisme cérébral.

---

**Авторы:** *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Потлов Антон Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника»; *Фролова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника»; *Проскурин Сергей Геннадьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## УПРАВЛЕНИЕ РАСПИСАНИЕМ МНОГОСВЯЗНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

**В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова,  
М. В. Лемкина, С. Н. А. Аль Кифер, М. А. Д. Аль Амиди**

*Кафедра «Информационные процессы и управление»,  
terehova.aa@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** информационные потоки; многосвязное производство; программный комплекс; расписание; управление; цифровизация.

**Аннотация:** Рассмотрена разработка цифровой системы управления, позволяющей формировать расписание многосвязного производства на внутрицеховом уровне, оперативно отслеживать изменения производственной среды и вносить своевременные коррективы в производственное расписание. Приведены требования к разрабатываемой системе, раскрыты выполняемые ею функции, для реализации которых исследовали информационные потоки между подразделениями предприятия, участвующими в формировании производственного расписания. Дано описание входной и выходной информации системы управления расписанием многосвязного производства. Показаны структура программного комплекса в виде DFD-диаграммы, внешние сущности, главные процессы и подпроцессы. Дано описание основных особенностей и возможностей системы управления расписанием многосвязного производства.

---

### Введение

Объектом управления в работе является многосвязная производственная система [1 – 7]. Цель работы – цифровизация процесса составления производственного расписания, оптимального с учетом ряда критериев, обеспечение мониторинга и диспетчеризации производства, сбор и хранение данных о ходе производства и состоянии производственных ресурсов.

Сущность задачи составления производственного расписания на предприятии заключается в следующем. Задано несколько типов различных изделий, которые должны быть изготовлены на предприятии. Для каждого изделия либо детали описана технология обработки, отражающая совокупность всех операций и взаимосвязь между ними, которую можно представить в виде сети для изделия, агрегата или узла, либо линейной структуры для детали. По каждой операции указано время ее выполнения, вид и количество трудовых и материальных ресурсов. В качестве таких ресурсов могут рассматриваться группы и отдельные единицы оборудования, бригады, рабочие, специальная оснастка, производственные площадки и т.п. Ресурсы, используемые для изготовления продукции, объединены в группы, включающие полностью либо частично взаимозаменяемые единицы. Каждая единица характеризуется собственным коэффициентом производительности.

Сформулирован ряд производственных ограничений, отражающих характер и тип производства, форму специализации, специфику технологических процессов, организационную структуру. Заданы правила, позволяющие сопоставлять различные варианты составления производственного расписания.

Требуется определить оптимальное производственное расписание: какие работы, из принятых заказов, будут выполняться, на каком оборудовании, в каких цехах и сколько времени, с тем чтобы сроки завершения выполнения заказов были выполнены.

Решение задачи цифровизации составления расписания на внутрицеховом уровне позволит рассчитать реальную себестоимость в соответствии с фактическими затратами, заработную плату согласно выполненной работе.

### **Задачи системы управления расписанием многосвязного производства**

Функции, задачи и представление данных по составлению расписания производства во многом зависят от типа производства. Задачи составления производственного расписания можно представить в виде двух взаимосвязанных блоков: объемно-календарного и оперативно-календарного производственных расписаний.

К началу планируемого периода известна следующая информация:

- об оставшихся мощностях цехов по каждому виду оборудования по месяцам в объемных показателях;
- заказах, поступивших к началу периода планирования;
- характеристиках каждого заказа: ресурсоемкости заказов по каждому виду работ, директивных и контрольных сроках завершения выполнения работ.

При составлении объемно-календарного производственного расписания оценивается возможность выполнения планов выпуска готовой продукции, формируются предварительное расписание производственного процесса и плановые документы на основе решения данных задач.

В оперативно-календарном производственном расписании указываются сроки выполнения отдельных планируемых работ, операций по каждой бригаде, оператору, рабочему месту, что дает возможность использовать его в оперативном управлении производством. Календарно-плановые расчеты включают разработку цикловых графиков узлов и общей сборки, определение календарных опережений подачи деталей и покупных комплектующих, расчет длительности производственного цикла.

Наличие производственного расписания облегчает задачи служб поставок необходимого сырья и полуфабрикатов, так как заранее становится известным к какому моменту времени и в каком количестве требуется поставить их для каждого производственного участка и каждого рабочего места.

Основное назначение системы управления расписанием – повышение производительности основного технологического оборудования и обеспечение прозрачности реализуемых в производстве технологических процессов, определение последовательности запуска заданий в производство, позволяющей обеспечить максимально возможную производительность и отгрузку в срок, минимизация влияния незапланированных работ или простоев на эффективность производства [8 – 11].

Основные цели цифровизации составления производственного расписания заключаются в следующем: повышать ритмичность работы, снижать вероятность аварийных ситуаций, более оперативно и качественно отслеживать появление различных возмущений, сказывающихся на ходе производства, поднять экономическую эффективность системы управления производством, помочь диспетчеру в принятии правильных решений при различных ситуациях, возникающих в процессе производства. Реализация данных целей должна быть заложена в цифровой системе управления производственным расписанием. Следовательно, необходимо создать систему с возможностями структурной оптимизации технологического процесса, адаптацией и оценкой точности моделей планирования загрузки оборудования в зависимости от конкретных производственных условий, а также минимальными издержками при внедрении в производство.

Система управления производственным расписанием составляет ядро системы управления современными производственными цехами, интегрируя в единое целое автоматизированную технологическую подготовку производства, календарное планирование, диспетчерский контроль состояния обрабатываемых изделий.

Система должна отвечать следующим требованиям:

- генерировать оптимальные расписания для любых типов технологических регламентов в пределах рассматриваемого типа производства;
- учитывать экономические факторы при составлении расписаний и использовать соответствующие критерии оптимальности;
- создавать расписания, обладающие высокой надежностью и помехоустойчивостью;
- поддерживать стратегию реактивного составления расписаний, то есть реализовывать динамический режим;
- обеспечивать возможность поэтапной разработки и подключения задач и подсистем на всем протяжении ее эксплуатации;
- обеспечивать способность изменения и наращивания функциональных возможностей системы, не выходя за рамки принятой изначально концепции развития технологической базы, в соответствии со специфическими потребностями пользователей, изменениями нормативов;
- обеспечивать возможность выбора произвольной конфигурации из набора имеющихся модулей, в зависимости от потребностей.

Разрабатываемая цифровая система управления выполняет следующие функции:

1. Возможность достаточно быстро и точно оценить, способно ли предприятие выполнить поступающие заказы в заданные сроки, причем получить данную информацию до запуска заказов в производство.

2. Поиск допустимых расписаний за приемлемое время. Кроме того, получаемое расписание должно удовлетворять не одному, а целому ряду ограничений, и по возможности минимизировать затраты на производство по нескольким задаваемым пользователем критериям.

3. Коррекция расписания работы, как всего цеха, так и конкретных единиц оборудования (рабочих мест) в оперативном порядке.

4. Контроль прохождения заказов.

5. Внесение актуальной информации о ходе выполнения конкретных технологических операций.

6. Обеспечение производственного процесса оперативными данными, создания таких условий, когда информационные потребности будут наиболее полно удовлетворены.

7. Простота эксплуатации и поддержки системы; понятный пользователю интерфейс.

Выполнение указанных функций позволит увеличить оперативность действий персонала, снизить долю материальных запасов и текущие издержки производства.

### **Описание информационных потоков**

Для реализации функций разрабатываемой системы управления необходимо исследовать информационные потоки между участвующими в составлении и реализации производственного расписания подразделениями предприятия: производственно-техническим отделом, технологической и ремонтной службами, конструкторским отделом, отделом материально-технического снабжения (МТС), планово-экономическим, складом, взаимодействие которых представлено в табл. 1.

## Документооборот

Наименование подразделения	Информация	
	выходная	входная
Производственно-технический отдел	Информация о персонале	План производства; месячная программа производства
Технологическая служба	Информация об оборудовании	–
Ремонтная служба	График ППР	
Конструкторский отдел	Технологическая карта изделий Спецификации изделий	
Отдел МТС	График поставок сырья и материалов	План закупок; отчет о потребностях в ресурсах
Планово-экономический отдел	–	Отчет об отклонениях от плановых нормативов; календарный план производства; отчет о загрузке производственных мощностей; отчет о возможности выполнения плана
Склад	Данные о сырье и материалах на складе	–

Входными данными для системы управления расписанием многосвязного производства являются:

- данные о заказах;
- спецификации изделий (представляют собой информацию обо всех узлах и сборочных единицах во всех вариантах исполнения);
- технологические карты изделий – информация об изделиях и операциях, которые необходимо совершить для его изготовления. Также здесь указывается информация об оборудовании, которое будет использоваться в ходе выполнения операции, критерии качества, нормы времени и другие параметры;
- информация об оборудовании – перечень всего оборудования, используемого в производстве. Для каждой единицы оборудования задается необходимый набор атрибутов: наименование, график работы, марка производителя, тип оборудования, допустимые виды производства, продукции (то есть изделия, в производстве которого данное оборудование может принимать участие), рабочий центр, в который включена данная единица оборудования;
- информация о персонале – представляет собой информацию о штатном расписании, графиках работы персонала, кадровых отпусках, больничных;
- данные о материалах и комплектующих на складе;
- график планово-профилактических ремонтов оборудования.

Система управления функционирует с использованием следующих справочников:

- единиц измерения, с указанием их кода и наименования;
- сырья и материалов, содержащий перечень материалов и комплектующих с указанием наименования, кода и единицы измерения;
- групп оборудования, с перечнем наименований;

– моделей оборудования, включающий перечень моделей оборудования с указанием наименования оборудования, кода или обозначения и группы оборудования, к которой оно относится;

– распределения оборудования, информирующий о количественном составе моделей оборудования в каждом цехе;

– технологических операций, с перечнем технологических операций;

– технологии производства, отражающий информацию по технологии производства для каждого вида продукции, а именно: номер операции, код технологической операции, код модели оборудования, на котором проводится данная операция, нормы времени и разряд работ;

– цехов, с информацией по каждому цеху предприятия: код цеха, наименование, тип производства и потери времени на переналадку оборудования;

– складских запасов, содержащий все номенклатурные единицы, используемые на предприятии. Для номенклатурных единиц, используемых в процессе производства, предусмотрена возможность указания аналогов и заменителей. Для заменителей можно указать коэффициент соотношения в том случае, если одну номенклатурную единицу можно заменить иным количеством номенклатурных единиц;

– показателей (для расчета эффективности модернизации предприятия);

– группы показателей, на которые разбивается весь перечень показателей;

– серийных объектов, с информацией об узлах оборудования и его местонахождении;

– выполняемых оборудованием функций, предназначенный для хранения информации о выполняемых функциях оборудования;

– режимов проверки, информирующий о сроке, через который нужно проводить проверку;

– работ для устранения отказа, имеющий в своем составе список работ, выполняемых для устранения отказа;

– материалов для работ производственно-технического отдела, содержащий информацию о материалах, используемых для проведения работ.

Выходной информацией системы управления расписанием многосвязного производства являются:

– план производства, где указываются изделия, которые требуется изготовить, их количество и желаемые даты изготовления. План производства разрабатывается на год, в течение которого, по мере необходимости, корректируется в соответствии с поступающими заказами;

– план закупок, включающий список сырья и материалов, требуемых для производства изделий, с указанием дат, к которым данные материалы должны быть закуплены;

– отчет о возможности выполнения плана производства – представляет собой оценку возможности выполнения данного плана с имеющимися производственными мощностями. Также в нем указаны «узкие места» (отсутствие достаточного для выполнения плана производства количества материалов, оборудования);

– отчет об отклонении от плановых нормативов;

– календарный план производства, представляющий собой сводный объемно-календарный график выполнения всех заказов;

– месячная программа производства работ, в которой указаны объемы работ по каждому заказу и сроки их выполнения;

– сетевая модель;

– диаграмма Ганта;

– справочник учета сырья, в котором ведется учет сырья на складе на начало каждого месяца;

– справочник незавершенного производства, отражающий величину незавершенного производства в норма-часах и единицах измерения продукции.

Основными выходными документами разрабатываемой системы управления расписанием являются объемно-календарный план производства и программа производства на месяц для каждого цеха. Расчет выходной информации осуществляется один раз в конце каждого месяца.

Потребителем конечной информации является планово-экономический отдел, который получает календарный план производства, отчеты о загрузке производственных мощностей и потребности в ресурсах. На основании данных документов в планово-экономическом отделе осуществляется планирование графика поставок сырья и материалов.

### Программный комплекс управления расписанием многосвязного производства

Рассмотрим структуру программного комплекса, представленную в виде DFD-диаграммы (рис. 1).

На представленной диаграмме внешними сущностями являются:

- производственно-технический отдел. В систему управления производственным расписанием из подсистемы производственно-технического отдела поступает информация о персонале, а в подсистему производственно-технического отдела – план производства, месячная программа производства;
- технологическая служба: из подсистемы технологической службы поступает информация об оборудовании;
- ремонтная служба: из подсистемы ремонтной службы – график планово-предупредительного ремонта (ППР);
- конструкторский отдел, из подсистемы которого поступают технологические карты изделий, спецификации изделий;
- отдел материально-технической службы (МТС): из информационной системы в подсистему отдела МТС – план закупок, отчет о потребностях в ресурсах;
- планово-экономический отдел: из информационной системы в подсистему планово-экономического отдела поступают отчеты об отклонениях от плановых нормативов, загрузке производственных мощностей, возможности выполнения плана производства, а из подсистемы планово-экономического отдела – портфель заказов.

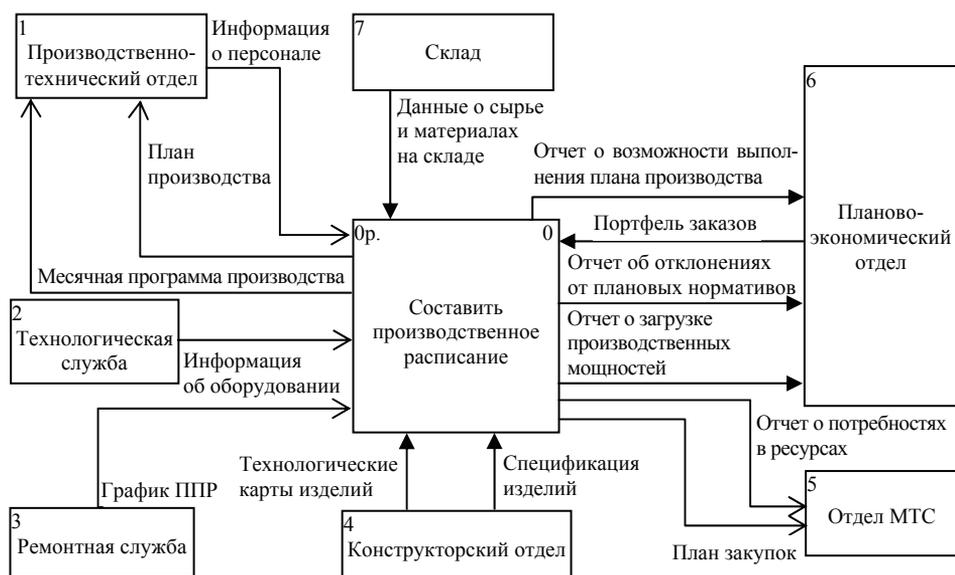


Рис. 1. Структура программного комплекса (контекстная диаграмма)

Составление производственного расписания включает в себя (рис. 2):

- планирование портфеля заказов и построение структуры декомпозиции работ (*англ.* Work Breakdown Structure (**WBS**));
- определение последовательности работ и построение сетевой график;
- планирование сроков, длительности и логических связей работ и построение диаграммы Ганта;
- определение потребности в ресурсах (люди, машины и механизмы, материалы и т.д.) и составление ресурсного плана портфеля заказов;
- расчет затрат и трудозатрат по портфелю заказов.

Процесс «Планирование сроков, длительности и логических связей работ и построение диаграммы Ганта» (рис. 3) состоит из подпроцессов (определения):

- перечня работ и сроков их выполнения, а также длительности работ;
- логических связей работ;
- построения диаграммы Ганта.

Основные особенности системы управления расписанием многосвязного производства:

### 1. Автоматическое вычисление времени выполнения операций.

В ходе производственного процесса возникают ситуации, когда время выполнения изначально указать невозможно. Например, в производственном подразделении могут существовать две единицы взаимозаменяемого оборудования,

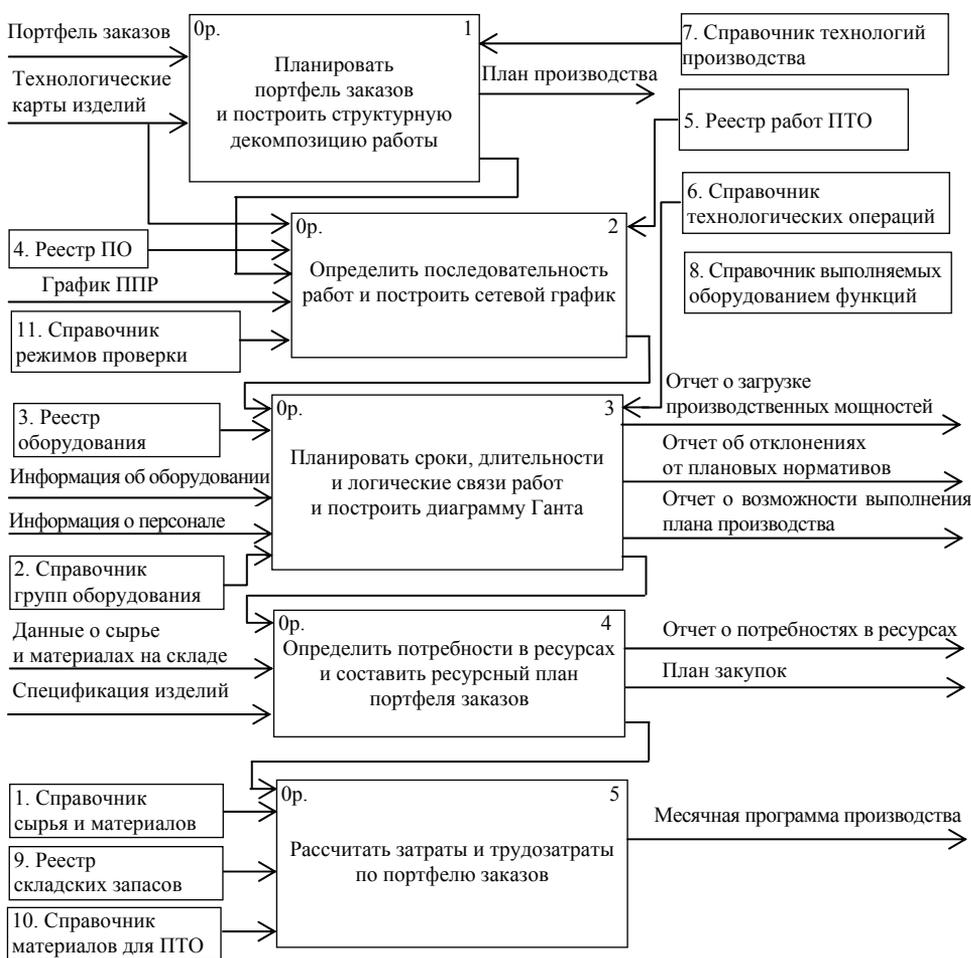


Рис. 2. Детализация контекстной диаграммы



**Рис. 3. Детализация процесса «Планирование сроков, длительности и логических связей работ и построение диаграммы Ганта»**

имеющие разную производительность. Выбор конкретной единицы оборудования, а, следовательно, и продолжительность технологической операции в данном случае зависят от предшествующей загрузки оборудования.

В системе управления можно определять подготовительное время и время выполнения операции автоматически в ходе расчета расписания. С этой целью для каждого вида работ, выполняемых на рабочем месте, требуется ввести данные о производительности и объеме операции в учетных единицах.

В случае, когда объем указан, подсистема расчета расписания самостоятельно вычисляет время выполнения операции на альтернативных рабочих местах, после чего выбирает оптимальное из них.

## 2. Усиленная поддержка сборов.

В системе управления реализованы функции, ориентированные на поддержку сборочных операций и операций обработки в сборе.

Система управления расписанием многосвязного производства поддерживает «горячее» формирование сборов в рассчитанном расписании: отдельную позицию (деталь, партию деталей) можно выводить из сбора, добавлять в него, а также переносить из одного в другой. При этом полностью учитываются существовавшие ранее правила взаимодействия операций.

Доступны также следующие действия, связанные со сборами:

- ввод способа вычисления подготовительного времени и времени обработки сбора (максимальное время либо сумма периодов выполнения операции для отдельных позиций);
- автоматическое вычисление продолжительности выполнения операции над сбором;
- возможность ввода для каждого сбора названия и текстового комментария;
- объединение в сбор позиций из разных заказов.

## 3. Контроль межоперационных запасов.

Система управления расписанием многосвязного производства позволяет контролировать наличие полуфабрикатов и готовых изделий того или иного заказа.

Как правило, также бывает необходимо обеспечить контроль над ресурсами, которые лишь временно связываются с заказом, а затем либо становятся полуфабрикатом (например, исходное сырье), либо возвращаются назад (технологическая оснастка), либо переносят свою стоимость на полуфабрикат (расходные материалы). Новый ресурс может возникнуть и в результате выполнения операции (восстановимый брак или отход, пригодный в качестве полуфабриката для другой операции).

В системе управления расписанием многосвязного производства для каждой операции можно указать, какие ресурсы, помимо полуфабрикатов, выдаются для выполнения операции и какие возвращаются после операции. В начале операции ресурсы исключаются из общего списка запасов и привязываются к операции. После завершения операции, возвращенные материальные ценности включаются в общий список запасов. Факты выдачи/приемки фиксируются.

При необходимости межоперационные запасы могут быть введены, а их состояние проконтролировано и изменено посредством специально предназначенной таблицы.

Для удобства поиска и редактирования список запасов разбит на отдельные группы. Состав и названия групп можно изменять при помощи подсистемы настройки.

4. Новые средства взаимодействия с другими программами и автоматизированными системами.

Система управления расписанием многосвязного производства также позволяет создать пользовательскую динамически подключаемую библиотеку, обеспечивающую импорт данных из файлов различных форматов.

5. Встроенная поддержка диаграмм в отчетах.

Интегрированный в систему управления расписанием многосвязного производства универсальный генератор отчетов позволяет проектировать и использовать в отчетах диаграммы и графики.

В систему управления встроено вычислительное ядро, генерирующее на основе текущих данных двух- и трехмерные гистограммы, круговые диаграммы и линейные графики. Ядро способно автоматически оптимизировать исходные данные для наилучшего отображения диаграмм, рисовать несколько графиков в одной системе координат.

Поддерживается прорисовка плавных линий (на основе кубических сплайнов) и линий трендов (аппроксимация по методу наименьших квадратов). Диаграммы создаются и настраиваются при помощи макрокоманд редактора отчета. Для быстрого создания простого документа с диаграммой можно воспользоваться мастером отчетов.

## **Заключение**

Разработана система управления расписанием многосвязного производства, которая является инструментом, позволяющим плановикам и диспетчерам быстрее и качественнее выполнять свою работу, принимать решения на основе более оперативной, полной и точной информации. Она служит средством для оценки выполнимости производственного плана при условии добавления новых заказов, проста в использовании и не требует слишком сложной предварительной подготовки. Алгоритм, реализованный в системе управления, предоставляет возможность быстро оценить, каким образом повлияет на расписание добавление новых заказов в план производства (с учетом требуемых сроков изготовления), и увидеть, возможно ли в принципе изготовить все запланированные заказы в данные сроки.

Таким образом, система управления расписанием многосвязного производства позволяет моделировать производственное расписание и получать в итоге оптимальный вариант календарного плана-графика выполнения портфеля заказов с оптимальными сроками.

Внедрение автоматизированного подхода дает возможность перенести значительную часть решения задач управления отделом на современный вычислительный комплекс, освобождая сотрудников предприятия от рутинных и трудоемких операций, а также оперативно получать необходимую полную и достоверную информацию, при этом исключить ошибки, неизбежные при ручном ведении данных операций.

### *Список литературы*

1. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака / В. С. Кудряшов, С. Г. Тихомиров, С. В. Рязанцев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 572 – 580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580
2. Джамбеков, А. М. Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций / А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 557 – 571. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.557-571
3. Конкина, В. В. Постановка задачи оптимального управления реверсивным режимом нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами / В. В. Конкина, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 248 – 256. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256
4. Чернышов, Н. Г. Синтез энергосберегающего управления / Н. Г. Чернышов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 7 – 15. doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.007-015
5. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062
6. Управление объектами с взаимосвязанными величинами / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 206 – 218. doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218
7. Технические средства автоматизации: программно-технические комплексы и контроллеры : учебн. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 180 с.
8. Системы диспетчеризации и управления : учебное пособие / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, И. С. Панченко, М. В. Кокорева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 96 с.
9. Дмитриевский, Б. С. Автоматизированные информационные системы управления инновационным наукоемким предприятием / Б. С. Дмитриевский. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 156 с.
10. Матвейкин, В. Г. Проектирование системы управления инновационно-производственной системой / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, И. С. Панченко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 289 – 296.
11. Панченко, И. С. Математическое моделирование и алгоритмизация организационно-технологических систем, производящих инновационную продукцию : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / И. С. Панченко. – Тамбов, 2012. – 16 с.

## Schedule Management of a Multi-Connected Production System

V. G. Matveikin, B. S. Dmitrievsky, A. A. Terekhova,  
M. V. Lemkina, S. N. A. Al Knfer, M. A. D. Al Amidi

*Department of Information Processes and Management,  
terekhova.aa@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** information flows; multi-connected production; software package; schedule; control; digitalization.

**Abstract:** The development of a digital control system is considered, which makes it possible to form a multi-connected production schedule at the intrashop level, to quickly track changes in the production environment and make timely adjustments to the production schedule. The requirements for the system being developed are given; the functions performed by it are disclosed, for the implementation of which the study of information flows between the divisions of the enterprise participating in the formation of the production schedule is carried out. A description of the input and output information of the multi-connected production schedule management system is given. The structure of the software package in the form of DFD diagrams, external entities, main processes and subprocesses is presented. The description of the main features and capabilities of the multi-connected production schedule management system is given.

### References

1. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Simulation method of a multiply-connected digital system for controlling ammonia synthesis], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Dzhambekov A.M., Shcherbatov I.A. [Optimal control of the catalytic reforming process of gasoline fractions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 557-571, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.557-571 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Konkina V.V., Solov'yev D.S., Litovka Yu.V. [Statement of the problem of optimal control of the reversible mode of electroplating in a bath with many anodes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 248-256, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Chernyshov N.G., Dvoretzkiy S.I. [Synthesis of energy-saving control], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 7-15, doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.007-015 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiply-connected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Saif M.H.M., Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Control of objects with interrelated values], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 206-218, doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G., Frolov S.V. *Tekhnicheskkiye sredstva avtomatizatsii: programmno-tekhnicheskkiye kompleksey i kontrollery: uchebnoe posobiye* [Technical means of automation: software and hardware systems and controllers: training manual], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 180 p. (In Russ.)
8. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Panchenko I.S., Kokoreva M.V. *Sistemy dispatcherizatsii i upravleniya: uchebnoye posobiye* [Dispatching and control systems: textbook], Tambov: Izdatel'stvo of TSTU, 2013, 96 p. (In Russ.)

9. Dmitrievsky B.S. *Avtomatizirovannyye informatsionnyye sistemy upravleniya innovatsionnym naukoymkim predpriyatiyem* [Automated information management systems for an innovative science-intensive enterprise], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2006, 156 p. (In Russ.)

10. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Panchenko I.S. [Designing a management system for an innovation-production system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 289-296. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Panchenko I.S. *Extended abstract of candidate's of technical thesis*, Tambov, 2012, 16 p. (In Russ.)

---

### **Zeitplanverwaltung des Multi-Connected-Produktionssystems**

**Zusammenfassung:** Es ist die Entwicklung eines digitalen Steuerungssystems in Betracht gezogen, das es ermöglicht, einen mehrfachen Produktionsplan auf innerbetrieblicher Ebene zu erstellen, Änderungen in der Produktionsumgebung schnell zu verfolgen und den Produktionsplan rechtzeitig zu korrigieren. Es sind die Anforderungen an das zu entwickelnde System angegeben. Offengelegt sind die von ihm ausgeführten Funktionen, für deren Realisierung die Untersuchung des Informationsflusses zwischen den an der Erstellung des Produktionsplans beteiligten Unternehmensbereichen durchgeführt ist. Die Beschreibung der Eingabe- und Ausgabeinformationen des mehrfach verbundenen Produktionsplan-Managementsystems ist gegeben. Die Struktur des Softwarepakets in Form von DFD-Diagrammen, externe Besonderheiten, Hauptprozesse und Unterprozesse sind gezeigt. Es ist die Beschreibung der Hauptmerkmale und Hauptfähigkeiten des Multi-Connected-Produktionsplan-Managementsystems gegeben.

---

### **Gestion de la planification d'un système de la production multi-liens**

**Résumé:** Est examinée l'élaboration d'un système de gestion numérique permettant de créer un calendrier de production multi-liens au niveau intra-tech, de suivre rapidement les changements dans l'environnement de la production et d'apporter des ajustements en temps opportun au calendrier de la production. Sont indiquées les exigences du système en cours de développement, sont révélées les fonctions qu'il remplit pour la mise en œuvre desquelles une étude des flux d'informations entre les unités de l'entreprise impliquées dans la formation du calendrier de production. Est donnée une description des informations d'entrée et de sortie du système de gestion du calendrier de la production multi-liens. Sont montrés la structure du logiciel sous la forme des diagrammes, les entités externes, le processus principaux et les sous-processus. Est donnée la description des principales caractéristiques et des capacités du système de gestion du calendrier de la production multi-liens.

---

**Авторы:** *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Терехова Анастасия Андреевна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Лемкина Мария Владимировна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Аль Кнфер Самер Нахи Альван* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Аль Амиди Мустафа Абдулкадим Дхаир* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ЭФФЕКТИВНОЕ НЕЧЕТКОЕ ЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Беларусси Уссама<sup>1</sup>, В. Ф. Калинин<sup>1</sup>, Амел Терки<sup>2</sup>

*Кафедра «Электроэнергетика», kalinin@tstu.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия;  
Университет имени Мохамеда Хидера (2), г. Бискра,  
Алжирская Народная Демократическая Республика*

**Ключевые слова:** метод «возмущения и наблюдения»; отслеживание точки максимальной мощности; регулятор с нечеткой логикой; фотоэлектрическая система.

**Аннотация:** Показана важность отслеживания точки максимальной мощности и способы ее достижения. Проанализированы методы «возмущения и наблюдения» и регулятора с нечеткой логикой (РНЛ). Проведено моделирование работы фотоэлектрической системы в различных условиях и рассмотрен принцип ее работы.

---

### Введение

Фотоэлектрическая система состоит из преобразователя постоянного тока, солнечной батареи и аккумулятора постоянного тока. Фотоэлектрические модули (батареи) обладают нелинейными характеристиками по напряжению и току, что затрудняет обеспечение качественной электрической энергией потребителей. Для решения проблемы применяют преобразователи, которыми можно управлять, изменяя рабочий цикл с помощью алгоритма отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ).

Метод ОТММ используется для получения максимальной эффективности солнечной батареи при варьировании значений температуры и солнечной радиации. Микроконтроллер, отслеживая точку максимальной мощности, меняет сопротивление, формирует рабочий цикл преобразователя до ее достижения. В последние годы разработано несколько методов, позволяющих эффективно отслеживать точку максимальной мощности [1].

Метод «возмущения и наблюдения» является наиболее часто используемым алгоритмом ОТММ в промышленных фотоэлектрических батареях. Контроллер фотоэлектрической батареи (панели) несколько увеличивает задание выходной мощности инвертора, определяя ее. Если выходная мощность действительно увеличилась, то она будет увеличиваться и дальше, до момента ее уменьшения, когда контроллер меняет задание, чтобы избежать резкого уменьшения мощности фотоэлектрической батареи [2]. Несмотря на то что алгоритм реализации метода «возмущения и наблюдения» прост в исполнении, ему присущ ряд проблем, в том числе продолжение работы в режиме колебаний даже при балансировке, что приводит к выходным колебаниям инвертора, и фотоэлектрическая система может не отследить точку максимальной мощности из-за внезапных изменений в поступлении солнечного света [3, 4].

В последнее время в системах ОТММ используется метод нечеткого управления. Преимущество данного метода управления состоит в его надежности, простоте разработки и отсутствии четких знаний законов регулирования [5, 6].

Оптимизация фотоэлектрической системы выполнялась двумя методами: «возмущения и наблюдения» и регулятора с нечеткой логикой (РНЛ). Рассмотрим принцип работы оптимальной фотоэлектрической системы. В работе приведены результаты, полученные в процессе моделирования с помощью пакета Simulink MATLAB-R2018a.

### Фотоэлектрическая система

Схема системы управления ОТММ, используемая для фотоэлектрической системы, показана на рис. 1.

Фотоэлектрический элемент (ФЭ) – элемент солнечной батареи, который функционирует без выброса вредных веществ в атмосферу. Фотоэлектрический модуль состоит из нескольких ФЭ, соединенных последовательно для повышения напряжения или параллельно для увеличения тока.

Каждый ФЭ можно смоделировать с использованием источника тока, диода и двух резисторов, называемых последовательным сопротивлением и шунтирующим сопротивлением. Также можно использовать модели с двумя диодами. Далее рассмотрим эквивалентную модель ФЭ с одним диодом (рис. 2) [7].

Основным блоком фотоэлектрических батарей (панелей) является ФЭ, который представляет собой полупроводниковый (*p-n*)-переход.

Модель фотоэлектрической панели определяет уравнение

$$I = I_{sc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}}, \quad (1)$$

где  $I$ ,  $I_{sc}$ ,  $I_0$  – токи фотоэлектрической батареи соответственно выходной, короткого замыкания и обратный ток насыщения;  $R_s$  – последовательное сопротивление

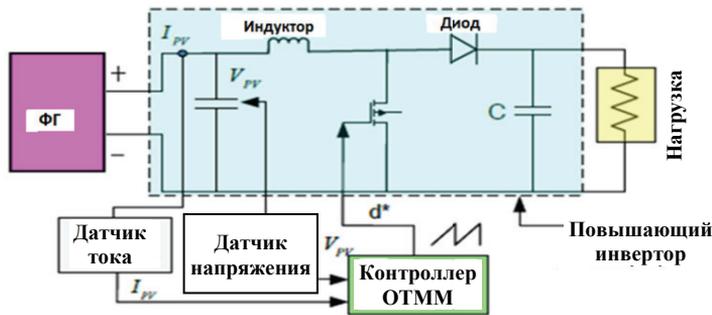


Рис. 1. Схема системы управления ОТММ

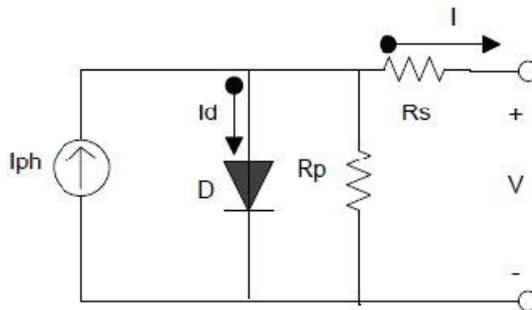


Рис. 2. Эквивалентная модель фотоэлемента

фотоэлектрической батареи;  $V_{th}$  – напряжение фотоэлектрической матрицы;  $R_{sh}$  – эквивалентное сопротивление шунта фотоэлектрической батареи.

Напряжение  $V_{th}$  и ток обратного насыщения  $I_0$  последовательно идентифицируются с помощью [8]:

$$V_{th} = \frac{(V_{mp} + R_s I_{mp} - V_{oc})}{\log\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)}, \quad (2)$$

где  $V_{mp}$  – напряжение;  $I_{mp}$  – выходной ток;

$$I_0 = (I_{sc} - I_{mp}) \exp\left(\frac{(V_{mp} + R_s I_{mp})}{V_{tn}}\right). \quad (3)$$

Усилительный инвертор предпочтителен для работы фотоэлектрических панелей и обычно используется в системах ОТММ для достижения максимальной мощности солнечной батареи, несмотря на периодическое изменение солнечного освещения [9]. Инвертор тока спроектирован с использованием пакета Simulink MATLAB-R2018a (рис. 3).

Функция инвертора заключается в управлении выходным напряжением  $V_o$  инвертора. Если величина рабочего цикла  $D$  для получения импульсов широтно-импульсной модуляции находится в диапазоне менее 0,5, инвертор понижает входное напряжение  $V_{in}$ . В случае, когда величина рабочего цикла  $D$  лежит в диапазоне более 0,5, инвертор повышает  $V_{in}$ . Данный процесс подтверждает уравнение

$$V_o = -V_{in} \left( \frac{D}{1-D} \right). \quad (4)$$

Когда инвертор работает в непрерывном режиме, минимальное значение индуктивности можно определить для нагрузки  $R$  с помощью определенной частоты переключения  $f_s$

$$L_{min} = \frac{R(1-D)^2}{2f_s}. \quad (5)$$

В схему инвертора входит конденсатор [10]

$$C = \frac{D}{Rf_s \Delta V_o}, \quad (6)$$

где  $\Delta V_o$  – пульсация  $V_o$ .

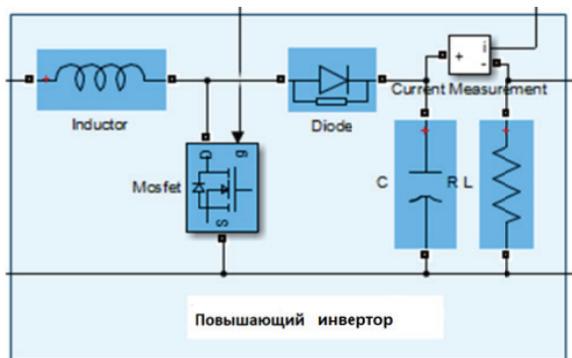


Рис. 3. Инвертор тока, спроектированный в Simulink MATLAB-R2018a

### Отслеживание точки максимальной мощности

Метод «возмущения и наблюдения». Блок-схема метода «возмущения и наблюдения» изображена на рис. 4.

Регулятор с нечеткой логикой. Управление с помощью РНЛ состоит из трех этапов (рис. 5):

- фазификация;
- считывание «база правил – таблицы истинности»;
- дефазификация.

Данные лингвистические высказывания сводят в табл. 1, где  $\mu_e$  и  $\mu_{\Delta e}$  – соответственно сигналы ошибки и ее изменения после нормализации [10].

Входными параметрами РНЛ являются  $E$  и  $\Delta E$ :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)}; \quad (7)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1). \quad (8)$$

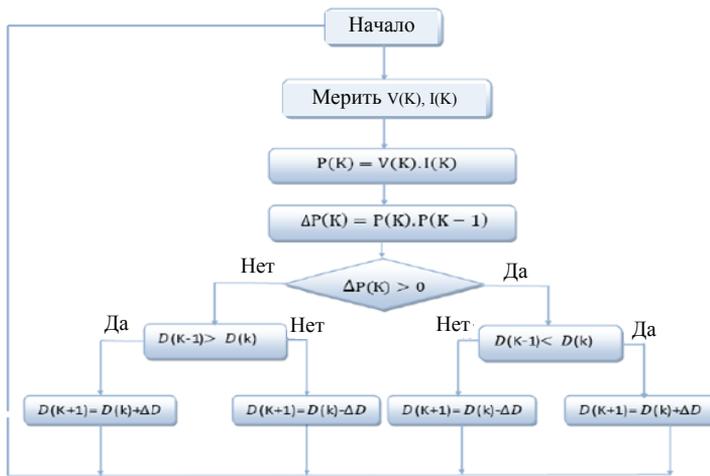


Рис. 4. Блок-схема метода «возмущения и наблюдения»

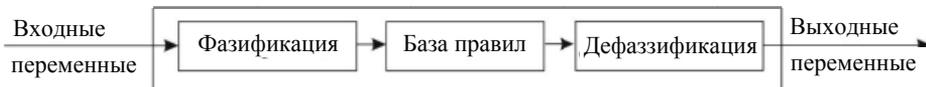


Рис. 5. Структурная схема регулятора с нечеткой логикой

Таблица 1

#### База правил регулятора с двумя входными сигналами

$\mu_e$	$\mu_{\Delta e}$				
	BN	N	Z	P	BP
BN	BN	BN	N	N	Z
N	BN	N	N	Z	P
Z	N	N	Z	P	P
P	N	Z	P	P	BP
BP	Z	P	P	BP	BP

## Результаты моделирования с использованием Simulink MATLAB-R2018a

На рисунке 6 представлена блок-схема системы для проведения исследований, показывающая все необходимые элементы – два входа, ввод температуры и переменного светового освещения (рис. 7), и позволяющая определить основные характеристики солнечной панели. Графики зависимости тока  $I = f(V)$  и мощности  $P = f(V)$  батареи от напряжения  $V$  представлены на рис. 8.

Моделирование выполняется с помощью фотоэлектрического модуля, максимальная мощность которого 213,15 Вт, ток короткого замыкания  $I_{sc}$  7,84 А и напряжение холостого хода  $V$  36,3 В. В стандартных условиях испытания освещенности ( $G = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>) температура (нормальная рабочая температура ячейки) 25 °С с импульсным прерывателем ( $C1 = C2 = 2000$  мкФ;  $L = 1$  мГн).

По результатам, полученным в процессе моделирования по методу «возмущения и наблюдения», обнаруживаются две основные проблемы: колебания точки максимальной мощности в установившемся режиме и плохое ее отслеживание при быстро меняющемся солнечном освещении (рис. 9 – 11).

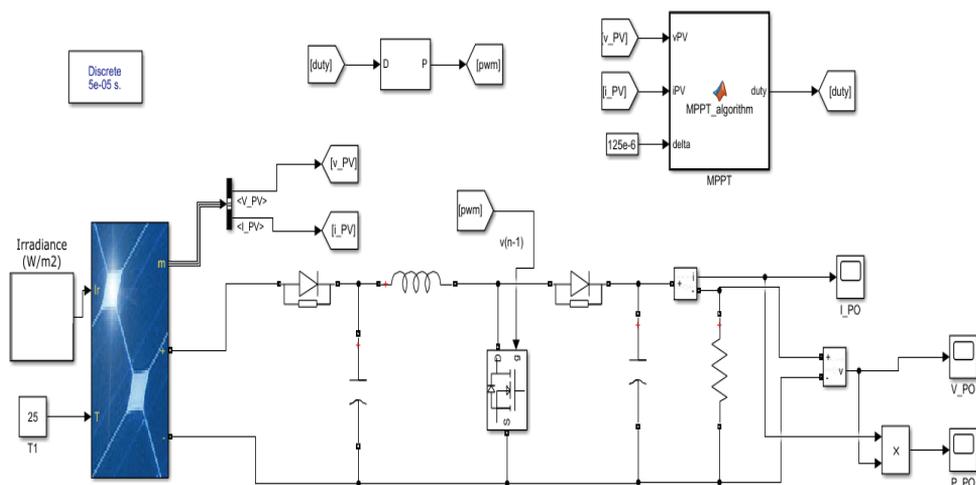


Рис. 6. Блок-схема эксперимента в Simulink MATLAB-R2018a

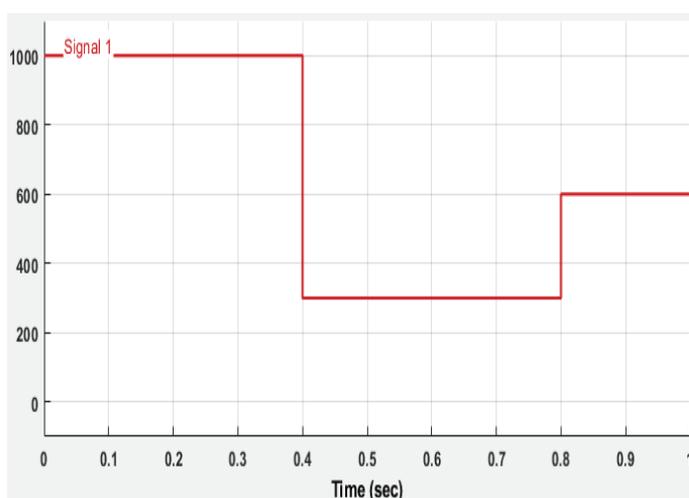
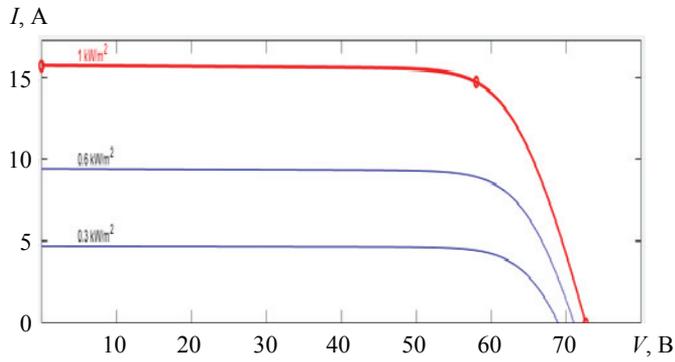
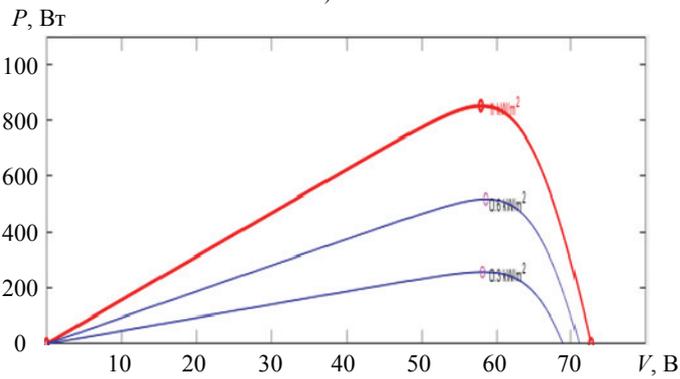


Рис. 7. Инсоляция – освещенность

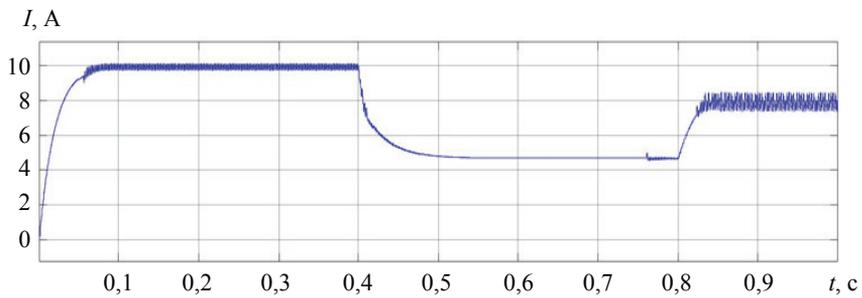


а)

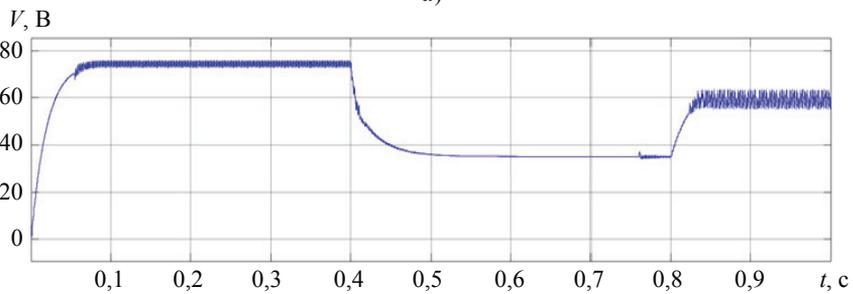


б)

Рис. 8. Графики зависимости тока  $I$  (а) и мощности  $P$  (б) батареи от напряжения  $V$



а)



б)

Рис. 9. Графики зависимости тока  $I$  (а), напряжения  $V$  (б) от времени солнечного освещения  $t$ , полученные по методу «возмущения и наблюдения» (начало)

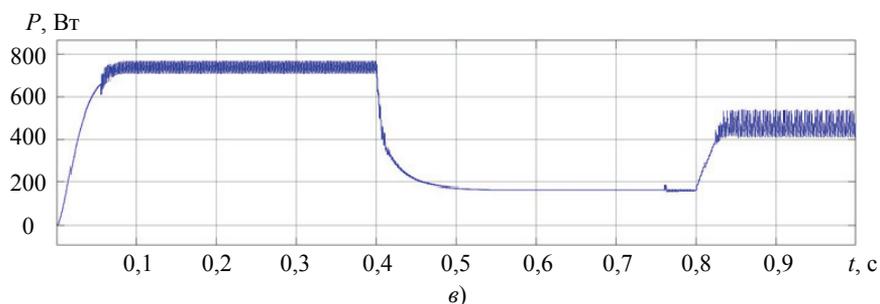


Рис. 9. Окончание. График зависимости мощности  $P(t)$

Рассмотрим синтезированный РНЛ (рис. 10), входными данными которого являются  $E$  и  $dE$ . Изменение  $D$  (рабочий цикл) является выходным параметром. На рисунке 11 показана база правил (нечеткие правила), созданная в работе на основе интуитивных рассуждений и опыта. Графики функций принадлежности входных переменных  $E$  и  $dE$  совпадают. Сокращения: big negative BN – большое отрицательное, negative N(NP) – отрицательное, zero Z(ZE) – ноль, positive P(PP) – положительное, big positive BP – большое положительное. При использовании РНЛ для фотоэлектрической системы, по результатам рис. 12 видно, что проблема колебания точки максимальной мощности отсутствует. Точка максимальной мощности хорошо отслеживается при меняющемся солнечном освещении.

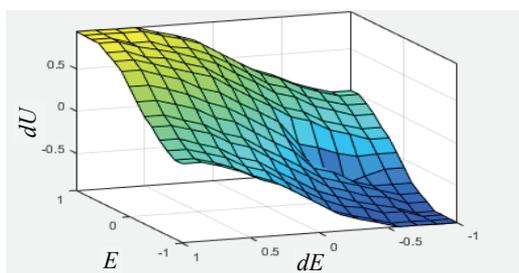


Рис. 10. Поверхность синтезированного РНЛ

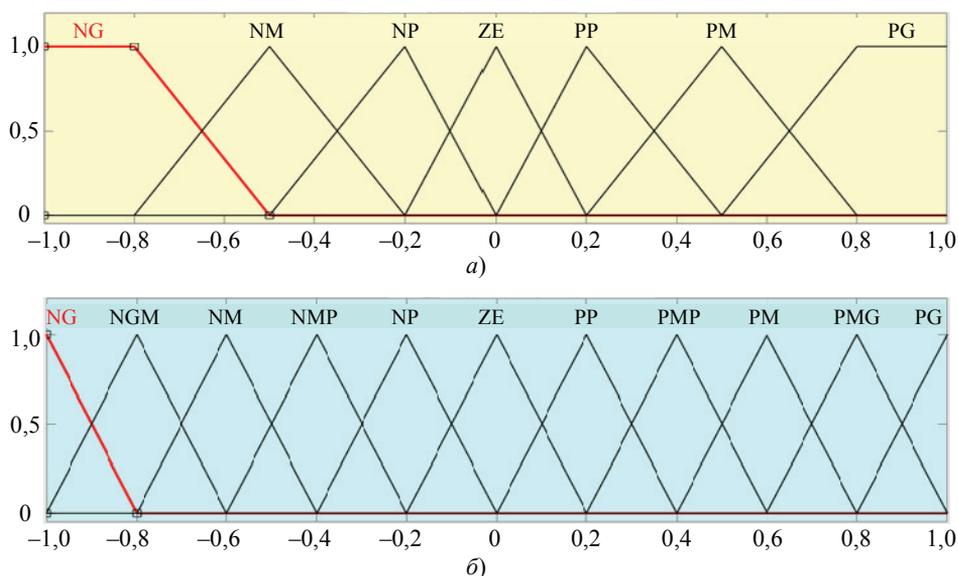
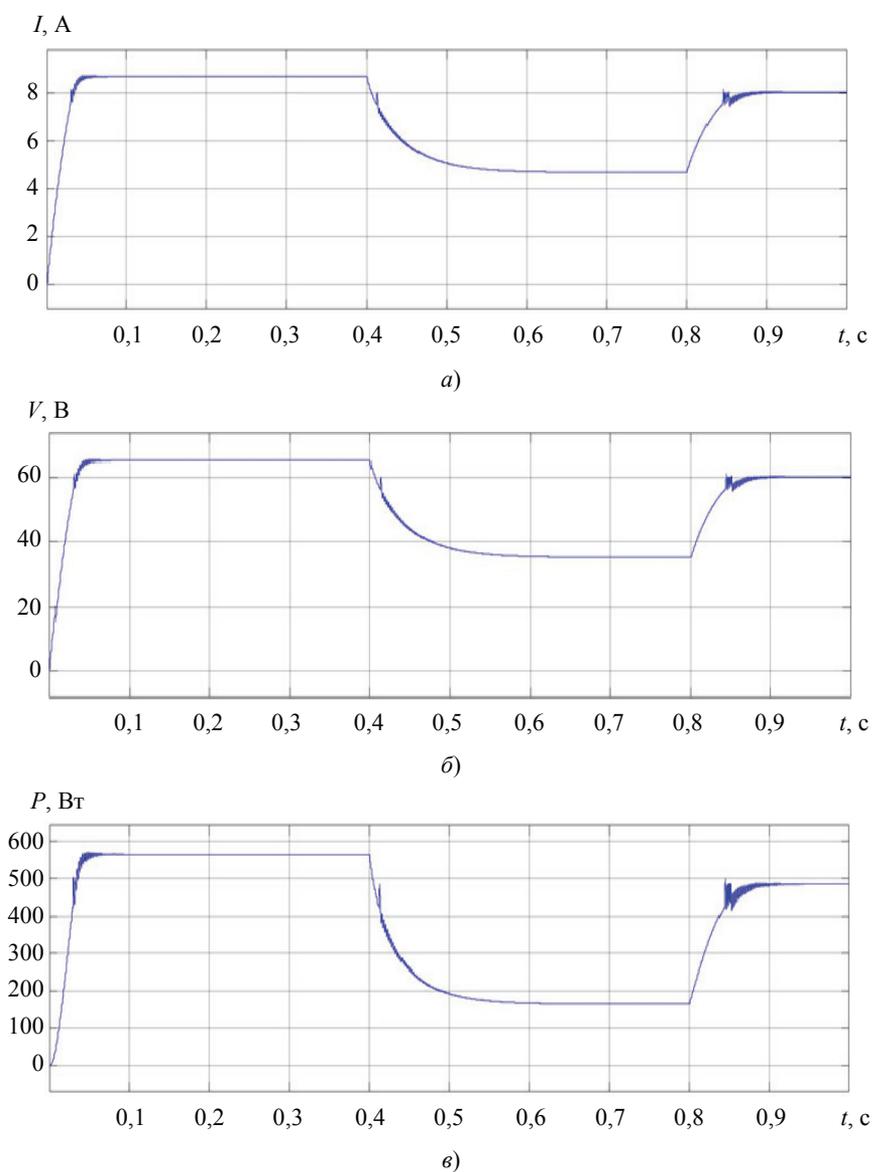


Рис. 11. Графики функций принадлежности:  
 $a$  – входных переменных  $E$  и  $dE$ ;  $b$  – выходной переменной  $dU$



**Рис. 12. Графики зависимости тока  $I$  (а), напряжения  $V$  (б) и мощности  $P$  (в) от времени солнечного освещения  $t$ , полученные по методу РНЛ**

### Заключение

В результате моделирования фотоэлектрической системы в Simulink MATLAB-R2018a сделаны следующие выводы. При применении РНЛ наблюдается высокая производительность с незначительными колебаниями напряжения постоянного тока и быстрое достижение точки максимальной мощности. Работа, проверка и контроль режимов фотоэлектрической системы с РНЛ выполнены при фиксированной температуре с переменной освещенностью. Контроллер с ОТММ, работающий на основе РНЛ, обеспечивает более высокую среднюю мощность во всех условиях.

Алгоритм метода «возмущения и наблюдения» использует не точную мощность солнечной панели, а пропорциональную разницу в ее мощности. Эффективность метода «возмущения и наблюдения» состоит в том, что даже при низких уровнях светового облучения, он обнаруживает точку максимальной мощности.

#### *Список литературы*

1. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System by Using Fuzzy Neural Network / Waleed I. Hameed, Ameer L. Saleh, Baha A. Sawadi [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – P. 33.

2. Design and Comparison of Perturb & Observe and Fuzzy Logic Controller in Maximum Power Point Tracking System for PV System by Using Matlab/Simulink / Gülsüm Nazlı Arpacı, Haluk Gözde, M. Cengiz Taplamacıoğlu // *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*. – 2019. – Vol. 3, Issue 1. – P. 66 – 71.

3. Mohanad, H. M. Comparative Study of Perturb & Observe, Modified Perturb & Observe and Modified Incremental Conductance MPPT Techniques for PV Systems / H. M. Mohanad, I. A. Inaam, A. A. Oday // *Engineering and Technology Journal*. – 2020. – Vol. 38, No. 4, Part A. – P. 478 – 490.

4. Bennacer, El H. Critical Study of Several MPPT Techniques for Photovoltaic Systems / El H. Bennacer, A. Haddi, A. G. Amrani // *Journal of Mechatronics and Robotics*. – 2019. – Vol. 3, No. 1. – P. 269 – 279.

5. Reddy, J. Control and Analysis of MPPT Techniques for Standalone PV System with High Voltage Gain Interleaved Boost Converter / J. Reddy, S. Natarajan // *Gazi University Journal of Science*. – Vol. 31(2). – P. 515 – 530.

6. Venkatesan, P. Application of Fuzzy Logic Controller to Solar Energy Conversion System with Sepic Converter / P. Venkatesan, S. Kannan // *Compliance Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 11, Issue 2. – P. 214 – 223.

7. Lagdani, O. An Optimization Of Perturb And Observe Mppt Algorithm Based On Fuzzy Logic For Pv System / O. Lagdani, M. Trihi, B. Bossoufi // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2019. – Vol. 97, No. 19. – P. 5061 – 5069.

8. Terki, Amel. Design of ANFIS Estimator of Permanent Magnet Brushless DC Motor Position for PV Pumping System / Amel Terki, Ammar Moussi, Nadjiba Terki // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2015. – Vol. 6, No. 10. – P. 136 – 142.

9. Hussain, A. A. High Performance PV System Based on Artificial Neural Network MPPT with PI Controller for Direct Current Water Pump Applications / A. A. Hussain // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. – 2019. – Vol. 10, No. 3. – P. 1329 – 1338.

10. Демидова, Г. Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г. Л. Демидова, Д. В. Лукичев. – М. : Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

---

## **Effective Fuzzy Logical Control for Photoelectric System Optimization**

**Belarussi Ussama<sup>1</sup>, V. F. Kalinin<sup>1</sup>, Amel Terki<sup>2</sup>**

*Department of Power Engineering, kalinin@tstu.ru; TSTU (1), Tambov, Russia;  
Mohamed Heder University (2), Biskra, Algerian People's Democratic Republic*

**Keywords:** “disturbance and observation” method; tracking the point of maximum power; fuzzy logic regulator; photoelectric system.

**Abstract:** The article shows the importance of tracking the point of maximum power and ways to achieve it. Methods of “perturbation and observation” and a fuzzy logic regulator (FLR) are analyzed. The modeling of the photovoltaic system operation in various conditions is carried out and the principle of its operation is considered.

### References

1. Hameed Waleed I., Saleh Ameer L., Sawadi Baha A., Al-Yasir Yasir I.A., Abd-Alhameed Raed A. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System by Using Fuzzy Neural Network, *Inventions*, 2019, vol. 4, p. 33.
2. Arpaci Gülsüm Nazlı, Gözde Haluk, Taplamacioğlu M. Cengiz Design and Comparison of Perturb & Observe and Fuzzy Logic Controller in Maximum Power Point Tracking System for PV System by Using Matlab/Simulink, *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2019, vol. 3, issue 1, pp. 66-71.
3. Mohanad H.M., Inaam I.A., Oday A.A. Comparative Study of Perturb & Observe, Modified Perturb & Observe and Modified Incremental Conductance MPPT Techniques for PV Systems, *Engineering and Technology Journal*, 2020, vol. 38, no. 4, part A, pp. 478-490.
4. Bennacer El H., Haddi A., Amrani A.G. Critical Study of Several MPPT Techniques for Photovoltaic Systems, *Journal of Mechatronics and Robotics*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 269-279.
5. Reddy J., Natarajan S. Control and Analysis of MPPT Techniques for Standalone PV System with High Voltage Gain Interleaved Boost Converter, *Gazi University Journal of Science*, vol. 31(2), pp. 515-530.
6. Venkatesan P., Kannan S. Application of Fuzzy Logic Controller to Solar Energy Conversion System with Sepic Converter, *Compliance Engineering Journal*, 2020, vol. 11, issue 2, pp. 214-223.
7. Lagdani O., Trihi M., Bossoufi B. An Optimization Of Perturb And Observe Mpppt Algorithm Based On Fuzzy Logic For Pv System, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2019, vol. 97, no. 19, pp. 5061-5069.
8. Terki Amel, Moussi Ammar, Terki Nadjiba Design of ANFIS Estimator of Permanent Magnet Brushless DC Motor Position for PV Pumping System, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2015, vol. 6, no. 10, pp. 136-142.
9. Hussain A.A. High Performance PV System Based on Artificial Neural Network MPPT with PI Controller for Direct Current Water Pump Applications, *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1329-1338.
10. Demidova G.L., Lukichev D.V. *Regulatory na osnove nechetkoy logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi obyektami* [Regulators based on fuzzy logic in control systems for technical objects], Moscow: Universitet ITMO, 2017, 81 p. (In Russ.)

---

## Effektive Fuzzy-Logik-Steuerung zur Optimierung der Photovoltaikanlage

**Zusammenfassung:** Im Artikel wird gezeigt, wie es wichtig ist, den Punkt maximaler Leistung zu verfolgen und Wege zu finden, um dies zu erreichen. Methoden der “Störung und Beobachtung” und eine Fuzzy-Logik-Steuerung (FLS) sind analysiert. Die Modellierung des Betriebs der Photovoltaikanlage unter verschiedenen Bedingungen ist durchgeführt und das Funktionsprinzip ihrer Arbeit ist betrachtet.

## Commande logique floue efficace pour optimiser le système photo-électrique

**Résumé:** Est montrée l'importance de suivre le point de la puissance maximale et les moyens de l'atteindre. Sont analysées les méthodes de “perturbation et observations” ainsi que du régulateur à logique floue (RLF). Est examiné le modélage du fonctionnement du système photo-électrique dans diverses conditions; est étudié le principe de son fonctionnement.

---

**Авторы:** *Уссама Беларусси* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Терки Амел* – доктор наук, научный консультант, Университет имени Мохамеда Хидера, г. Бискра, Алжирская Народная Демократическая Республика.

**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

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

**В. В. Меньших, Н. Е. Чиркова**

*Кафедра математики и моделирования систем, menshikh@list.ru;  
ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел  
Российской Федерации», г. Воронеж, Россия*

**Ключевые слова:** гетерогенная система; общественная безопасность; схема ветвей и границ; численный метод оптимизации.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы разработки численного метода оптимизации расположения элементов системы видеонаблюдения с учетом обеспечения их собственной безопасности. Обоснована необходимость использования схемы ветвей и границ при разработке данного метода, что позволяет с высокой эффективностью осуществлять поиск оптимального решения. Определены способы формирования дерева частичных решений, оценки частичных решений, обхода вершин дерева частичных решений. Показан численный пример реализации предложенного метода.

---

### Введение

В современных условиях широкое распространение получили гетерогенные системы обеспечения общественной безопасности (ГСООБ). Данные системы относятся к классу сложных систем и характеризуются большим количеством разнородных элементов, взаимосвязанных друг с другом [1]. Эффективность функционирования ГСООБ в последнее время существенно возрастает за счет включения в нее подсистемы видеонаблюдения, базирующейся на использовании современных информационных технологий [2]. Однако при функционировании систем видеонаблюдения могут возникать трудности, связанные с выходом из строя технических средств видеонаблюдения (ТСВ).

Потеря сигнала от ТСВ может быть обусловлена целым рядом причин: программными сбоями, неблагоприятными погодными условиями, отключением электроэнергии и др. Одной из наиболее серьезных причин выхода из строя ТСВ является совершение в их отношении противоправных посягательств, самыми распространенными среди которых считаются кража и порча. Это связано с тем, что данные средства обладают высокой эффективностью в предотвращении действий преступного характера, а также зачастую имеют высокую стоимость. Оператор мониторингового центра, не имея визуального контроля за вышедшим из строя ТСВ, не может принять верного управленческого решения, в силу того, что не известна причина, по которой произошло данное событие.

Таким образом, возникает задача оптимизации расположения ТСВ с учетом обеспечения их собственной безопасности. Вопросы функционирования систем видеонаблюдения на отдельно взятых объектах хорошо изучены [3 – 5]. Однако решению задачи оптимального расположения ТСВ, характеризующейся большой

размерностью [6], и, как следствие, трудностью вычислений для крупномасштабных систем видеонаблюдения (например, городских), уделено недостаточно внимания. Цель работы – разработка эффективного численного метода для поиска оптимального решения данной задачи.

### Описание математической модели

Вопросам разработки математической модели оптимизации расположения ТСВ с учетом их собственной безопасности посвящена работа [6]. В данной модели осуществляется распределение по потенциальным местам установки ТСВ различных типов так, что обеспечить контроль не только всех охраняемых зон, но и мест установки других ТСВ. Учитывая, что ТСВ различных типов отличаются стоимостью и возможность контроля всех мест размещения ТСВ, как правило, невозможна, в модели максимизируется суммарная стоимость ТСВ на контролируемых местах размещения. Однако данная работа не содержит описания эффективного метода нахождения численного решения задачи на основе разработанной модели. С этой целью осуществим формализацию задачи.

Обозначим:

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_{|O|}\}$  – множество охраняемых зон;

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$  – множество потенциальных мест установки ТСВ;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{|T|}\}$  – множество типов ТСВ;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{|T|}\}$  – множество стоимостей типов ТСВ;

$q_{ijks}$  – параметр, определяющий возможность контроля  $p_{ijk}$  с места  $m_i$  ТСВ типа  $t_j$  за зоной  $o_k$  и местом установки другого ТСВ  $m_s$ ;

$x_{ijk}$  – переменная, определяющая факт контроля ТСВ типа  $t_j$  за зоной  $o_k$  с места  $m_i$ ;

$$X = \{x_{ijk}\}, \quad \forall i = 1, \dots, |M|, \quad \forall j = 1, \dots, |T|, \quad \forall k = 1, \dots, |O|.$$

Отметим, что место установки ТСВ типа  $t_j$  может одновременно контролироваться несколькими ТСВ, поэтому его стоимость  $c_j$  необходимо учитывать лишь однажды, что определяется выражением  $\text{sign} \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (x_{ijk} q_{ijks})$ .

Таким образом, формализованное описание данной модели имеет следующий вид нахождения

$$X^* = \arg \max \sum_{s=1}^{|M|} \sum_{l=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (c_l x_{slk}) \text{sign} \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (x_{ijk} q_{ijks}), \quad (1)$$

при ограничениях:

1) на обязательную охрану каждой зоны  $o_k$

$$\forall k \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{j=1}^{|T|} x_{ijk} \geq 1; \quad (2)$$

2) число вариантов фактического расположения ТСВ, которое не может превышать числа возможных вариантов  $p_{ijk}$

$$\forall i \forall j \forall k x_{ijk} \leq p_{ijk}; \quad (3)$$

3) условие размещения не более одного ТСВ в потенциальном месте установки

$$\forall i \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} x_{ijk} \leq 1; \quad (4)$$

4) условие ограниченного количества ТСВ

$$\sum_{i=1}^{|M|} \sum_{k=1}^{|O|} x_{ijk} \leq \hat{T}_j, \quad (5)$$

где  $\hat{T}_j$  – количество ТСВ типа  $t_j$ .

Получение точного решения задачи (1) – (5) за приемлемое время в силу ее большой размерности может оказаться невозможным, что определяет целесообразность использования итерационных подходов, среди которых можно выделить схему ветвей и границ [7, 8]. Ее преимуществом является то, что достаточно быстро на первом этапе, используя идеи «жадного» алгоритма или других эвристических алгоритмов, находится первое приближенное решение, которое далее может только улучшаться. Кроме того, по ходу решения возможен контроль точности найденных приближенных решений. Поэтому, в случае ограниченного времени и/или достаточной точности решения, можно остановиться на текущем приближенном решении.

### Численный метод

Обратимся к разработке численного метода на основе схемы ветвей и границ для решения задачи (1) – (5).

*Способ формирования дерева частичных решений.* Под частичными решениями, то есть вершинами дерева частичных решений, будем понимать иерархически упорядоченные подмножества множества вариантов размещения ТСВ на контролируемой территории. Листами (концевыми вершинами) дерева частичных решений являются одноэлементные подмножества, то есть потенциально возможные решения задачи (1) – (5).

Рассмотрим принцип формирования вершин первого уровня иерархии дерева частичных решений.

Введем следующие обозначения:

$W$  – все множество вариантов расположения элементов системы видеонаблюдения, которое является корнем дерева частичных решений;

$W_{1jk}$  – множество всех вариантов, в которых на месте  $m_1$  установлено ТСВ типа  $t_j$ , наблюдающее за зоной  $o_k$ .

Очевидно, что:

$$1) \forall j \forall k W_{1jk} \subseteq W;$$

$$2) \forall j_1 \forall j_2 \forall k_1 \forall k_2 W_{1j_1k_1} \cap W_{1j_2k_2} = \emptyset, \text{ если } j_1 \neq j_2 \text{ и/или } k_1 \neq k_2;$$

$$3) \bigcup_{j=1}^{|T|} \bigcup_{k=1}^{|O|} W_{1jk} = W.$$

Аналогичным образом формируются остальные вершины дерева частичных решений. Пусть  $W_{1j_1k_1, 2j_2k_2, \dots, qj_qk_q}$  – множество всех вариантов расположения ТСВ, в которых:

на месте  $m_1$  установлено ТСВ типа  $t_{j_1}$ , контролирующее зону  $o_{k_1}$ ;

на месте  $m_2$  установлено ТСВ типа  $t_{j_2}$ , контролирующее зону  $o_{k_2}$ ;

...

на месте  $m_q$  установлено ТСВ типа  $t_{j_q}$ , контролирующее зону  $o_{k_q}$ .

Указанные множества образуют иерархическое дерево, что следует из следующих их свойств, которые нетрудно доказать:

- 1)  $\forall j_1 \dots \forall j_q \forall k_1 \dots \forall k_q W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1} q j_q k_q} \subseteq W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1}}$ ;
- 2)  $\forall j_1 \dots \forall j_{q-1} \forall j_q \forall k_1 \dots \forall k_{q-1} \forall k_q$  и  $\forall j_1 \dots \forall j_{q-1} \forall j_q \forall k_1 \dots \forall k_{q-1} \forall k_q$ ;

$W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1}, q_1 j_{q_1} k_{q_1}} \cap W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1}, q_2 j_{q_2} k_{q_2}} = \emptyset$ , если  $q_1 \neq q_2$   
и/или  $o_1 \neq o_2$ ;

$$3) \bigcup_{d=1}^{|T|} \bigcup_{p=1}^{|O|} W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1}, q_d j_{q_d} k_{q_d}} = W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1}}.$$

*Способ оценки частичных решений.* Обратимся к нахождению оценок частичных решений. Поскольку решается оптимизационная задача максимизации, оценки должны:

- 1) мажорировать стоимость всех защищаемых элементов (ТСВ) во множестве, составляющем частичные решения;
- 2) монотонно убывать при спуске по дереву частичных решений.

Вычисление оценки частичных решений предлагается осуществлять по формуле

$$\sum_{s=1}^{|M'|} \sum_{l=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (c_l \tilde{x}_{slk}) \text{sign} \sum_{i=1}^{|M'|} \sum_{j=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|O|} (\tilde{x}_{ijk} q_{ijks}) + (|M| - |M'|) \max_{l=1, \dots, |T|} (c_l), \quad (6)$$

где  $M' = \{1, \dots, q\}$  – множество мест, для которых осуществляется выбор типов ТСВ и защищаемых зон;  $\tilde{x}_{slk}$  и  $\tilde{x}_{ijk}$  – значения переменных  $x_{slk}$  и  $x_{ijk}$  для выбранных мест размещения ТСВ.

Выполнение свойства 1) следует из того, что на все не назначенные места назначаются ТСВ с наибольшей стоимостью; свойства 2) – для нового места  $q$  выбирается конкретное ТСВ, стоимость которого заведомо не больше, чем учтенная ранее во множестве  $W_{ij_1 k_1, \dots, q-1 j_{q-1} k_{q-1}}$  в соответствии с оценкой (6).

*Способ обхода вершин дерева частичных решений.* Обход дерева частичных решений включает в себя два этапа:

- нахождение первоначального решения;
- обход вершин дерева в целях возможного улучшения первоначального решения.

На начальном этапе осуществляется спуск по дереву частичных решений на основе последовательного распределения ТСВ по местам  $m_i$  для охраны зон  $o_k$  так, что на выбранные места размещаются ТСВ максимальной стоимости из числа оставшихся на данный момент, то есть реализуется принцип «жадного» алгоритма.

Далее осуществляется последовательный ограниченный обход вершин дерева решений. Ограничение обхода определяется недопустимостью множеств вариантов, которая может возникнуть в силу следующих обстоятельств:

- оценка для очередной вершины оказывается меньше (6), вследствие чего все подмножества соответствующего этой вершине множества вариантов являются неприемлемыми;
- не выполняются ограничения (3) – (5) для переменных  $\tilde{x}_{slk}$  и  $\tilde{x}_{ijk}$ , описывающих уже проведенный выбор мест размещения ТСВ.

Кроме того, ограничение (2) должно быть проверено для концевых вершин, содержащих единственный вариант. Если в ходе обхода дерева частичных решений находится лучший вариант, то все последующие сравнения проводятся с ним.

### Численный пример

Предположим, что необходимо обеспечить визуальный контроль за тремя зонами, а также за тремя местами установки ТСВ в целях максимизации их защищенности (рис. 1). Для этого требуется расположить в некоторых местах ТСВ двух различных типов: поворотные и неповоротные. При распределении ТСВ также необходимо учитывать наличие препятствия, которое ограничивает визуальный контроль с места  $m_3$  за зоной  $o_3$ .

Для данного примера введем ограничения на количество ТСВ различных типов:  $\hat{T}_{j_1} = 1$  (поворотные ТСВ),  $\hat{T}_{j_2} = 3$  (узконаправленные ТСВ). Стоимости ТСВ каждого типа равны 2 усл.ед. и 1 усл.ед. соответственно. Перейдем к формированию дерева частичных решений. Первое решение, которое удовлетворяет всем введенным ограничениям, объявляется рекордным (рис. 2).

Следующим этапом является оптимизация полученного решения, осуществляемая в соответствии с разработанными правилами обхода вершин данного дерева частичных решений (рис. 3). Варианты, не удовлетворяющие хотя бы одному из условий (2) – (5) не рассматриваются.

Итоговым результатом является оптимальный вариант расположения ТСВ с учетом их собственной безопасности  $W = (w_{123}, w_{211}, w_{322})$ .

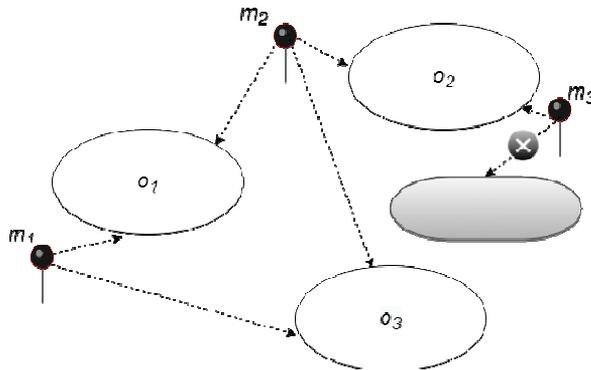


Рис. 1. Схема расположения элементов системы видеонаблюдения

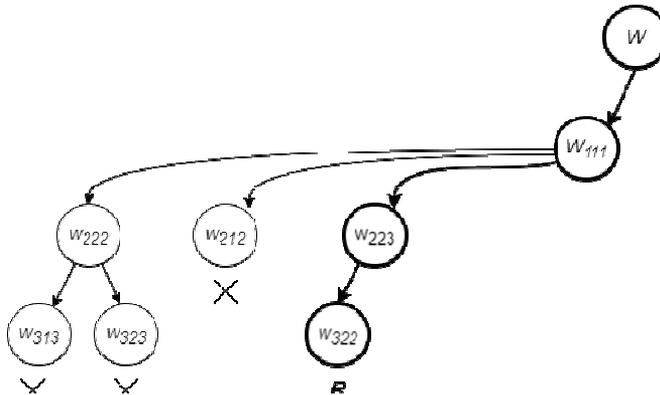


Рис. 2. Поиск первого решения

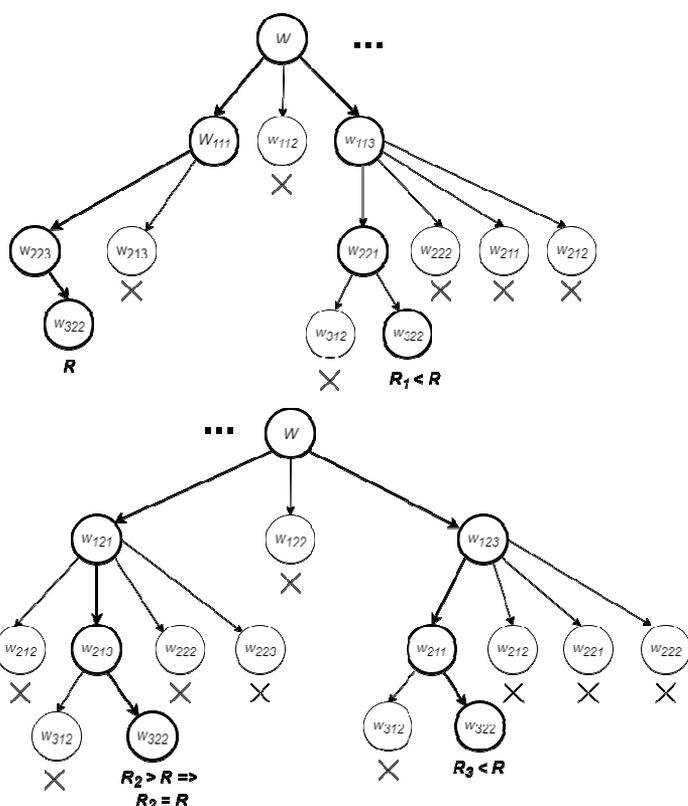


Рис. 3. Этапы обхода вершин дерева частичных решений

### Заключение

В работе представлен численный метод оптимизации расположения ТСВ по охраняемым объектам с учетом их собственной безопасности. Предложенный метод основан на использовании схемы метода ветвей и границ, что позволяет с высокой эффективностью осуществлять поиск оптимального решения. Данный метод может быть применен для проектирования систем видеонаблюдения различных масштабов.

### Список литературы

1. Математическое моделирование действий органов внутренних дел в чрезвычайных обстоятельствах : монография / В. В. Меньших, А. Ф. Саморковский, В. В. Горлов [и др.]. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2016. – 187 с.
2. Меньших, В. В. Моделирование информационных систем центров ситуационного управления : монография / В. В. Меньших, О. В. Пьянков, И. В. Щербакова. – Воронеж : Научная книга, 2010. – 127 с.
3. Орехов, П. В. Построение модели оптимизации размещения фоторадарных комплексов / П. В. Орехов, В. В. Меньших // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., 1 октября 2014 г., Воронеж. – Воронеж, 2014. – С. 138 – 144.
4. Белобородов, А. Обзор камер видеонаблюдения для промышленных объектов / А. Белобородов // РУБЕЖ : информационно-аналитический журнал. – 2017. – № 1. – С. 42 – 50.

5. Хонович, Д. Проектирование систем видеонаблюдения. – Текст : электронный / Д. Хонович // Компания «Телекамера». – URL : [https://www.telecamera.pro/video/useful/articles/?ELEMENT\\_ID=13912](https://www.telecamera.pro/video/useful/articles/?ELEMENT_ID=13912) (дата обращения: 14.01.2021).

6. Menshikh, V. V. Model of Optimization of Arrangement of Video Surveillance Means with Regard to Ensuring their Own Security / V. V. Menshikh, D. Yu. Kalkov, N. E. Spiridonova // Proceedings 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 20 – 22 November, 2019, Lipetsk. – Lipetsk, 2020. – P. 4 – 7. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947617

7. Меньших, А. В. Модель и численный метод оптимизации выбора действий органов внутренних дел при возникновении чрезвычайных обстоятельств криминального характера / А. В. Меньших, В. В. Горлов // Вестн. Воронежского ин-та МВД России. – 2016. – № 2. – С. 213 – 221.

8. Zvereva, D. D. Optimization of Processes of Modernization and Operating Conditions of Infocommunication Networks / D. D. Zvereva, V. V. Menshikh, A. V. Seifer // Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference, 13 – 15 November, 2018, Chelyabinsk. – Chelyabinsk, 2018. – 6 p. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570087

---

## A Numerical Method for Optimization of the Arrangement of Elements of a Video Surveillance System Taking into Account their Safety

V. V. Menshikh, N. E. Chirkova

*Department of Mathematics and Systems Modeling, menshikh@list.ru;  
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs Russian Federation,  
Voronezh, Russia*

**Keywords:** heterogeneous system; public safety; branch and boundary diagram; numerical optimization method.

**Abstract:** The article deals with the development of a numerical method for optimizing the arrangement of elements of a video surveillance system, taking into account their own safety. The necessity of using the branch and bound scheme in the development of this method is substantiated, which makes it possible to search for an optimal solution with high efficiency. Methods of forming a partial decision tree, evaluating partial solutions, traversing the vertices of a partial decision tree are determined. A numerical example of the implementation of the proposed method is shown.

### *References*

1. Men'shikh V.V., Samorokovskiy A.F., Gorlov V.V. [et al.] *Matematicheskoye modelirovaniye deystviy organov vnutrennikh del v chrezvychaynykh obstoyatel'stvakh: monografiya* [Mathematical modeling of the actions of internal affairs bodies in emergency circumstances: monograph], Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2016, 187 p. (In Russ.)

2. Men'shikh V.V., P'yankov O.V., Shcherbakova I.V. *Modelirovaniye informatsionnykh sistem tsentrov situatsionnogo upravleniya: monografiya* [Modeling of information systems of situational management centers: monograph], Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010, 127 p. (In Russ.)

3. Orekhov P.V., Men'shikh V.V. *Obshchestvennaya bezopasnost', zakonnost' i pravoporyadok v III tysyacheletii* [Public safety, legality and law and order in the III millennium], Proceedings of the International Scientific-Practical Conference, 1 October, 2014, Voronezh, 2014, pp. 138-144. (In Russ.)

4. Beloborodov A. [Review of CCTV cameras for industrial facilities], *RUBEZH: informatsionno-analiticheskiy zhurnal* [RUBEZH: information and analytical journal], 2017, no. 1, pp. 42-50. (In Russ.)

5. [https://www.telecamera.pro/video/useful/articles/?ELEMENT\\_ID=13912](https://www.telecamera.pro/video/useful/articles/?ELEMENT_ID=13912) (accessed 14 January 2021).

6. Menshikh V.V., Kalkov D.Yu., Spiridonova N.E. Model of Optimization of Arrangement of Video Surveillance Means with Regard to Ensuring their Own Security, Proceedings 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 20 - 22 November, 2019, Lipetsk, 2020, pp. 4-7, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947617 (In Russ.)

7. Men'shikh A.V., Gorlov V.V. [Model and numerical method for optimizing the choice of actions of the internal affairs bodies in the event of extraordinary circumstances of a criminal nature], *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2016, no. 2, pp. 213-221. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Zvereva D.D., Menshikh V.V., Seifer A.V. Optimization of Processes of Modernization and Operating Conditions of Infocommunication Networks, Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference, 13 - 15 November, 2018, Chelyabinsk, 2018, 6 p., doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570087 (In Russ.)

---

### **Numerische Methode zur Optimierung der Platzierung der Elemente des Überwachungssystems unter Berücksichtigung ihrer Sicherheit**

**Zusammenfassung:** Es sind die Fragen der Entwicklung der numerischen Methode der Optimierung der Anordnung der Elemente des Systems der Videoüberwachung unter Berücksichtigung der Gewährleistung ihrer eigenen Sicherheit betrachtet. Die Notwendigkeit der Verwendung des Verzweigungsschemas und Schemas der Grenzen bei der Entwicklung dieser Methode ist begründet, was es ermöglicht, mit hoher Effizienz nach der optimalen Lösung zu suchen. Es sind Methoden zur Bildung eines Teilentscheidungsbaums, Bewertung von Teillösungen, Umgehung der Eckpunkte des Baums der Teilentscheidungen bestimmt. Ein numerisches Beispiel für die Implementierung des vorgeschlagenen Verfahrens ist gezeigt.

---

### **Méthode numérique d'optimisation du placement des éléments du système de surveillance en tenant compte de leur sécurité**

**Résumé:** Sont envisagés les problèmes de la mise au point d'une méthode numérique pour adapter les éléments du système de vidéosurveillance à leur propre sécurité. Est justifiée l'utilisation du schéma des branches et des limites dans la conception de cette méthode, ce qui permet de trouver la meilleure solution. Est montré l'exemple numérique d'implémentation de la méthode proposée.

---

**Авторы:** *Меньших Валерий Владимирович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования систем; *Чиркова Наталья Евгеньевна* – адъюнкт, ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», г. Воронеж, Россия.

**Рецензент:** *Алексеев Владимир Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР ВРЕМЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Е. И. Алгазин

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

**Ключевые слова:** временные соотношения; комплексная плоскость; линейная система автоматики.

**Аннотация:** Предложено динамическое описание поведения исследуемого параметра (напряжения на конденсаторе  $U_C$ ) данной для анализа линейной системы автоматики. Рассмотрена в динамике смена структур временных соотношений и получено качественное описание исследуемого параметра в каждой из структур. Исследован переход  $U_C$  в области отрицательного и положительного вещественного времени. Дано объяснение отсутствию необходимости управления и «вторжения» исследуемого параметра  $U_C$  в мнимую часть из вещественной.

---

### Введение

Введение понятия структур времени и использование линейных систем автоматики для их изучения, с одной стороны, позволяет получать и накапливать информацию об особенностях поведения линейных систем автоматики при смене структур, с другой – ставит новые вопросы и требования при исследовании. Примером может служить следующий вопрос: долговечность конструктива линейной системы автоматики, используемой для исследования структур временных соотношений, и устойчивость его к энергетическим воздействиям.

### Постановка задачи

Дана линейная система автоматики (ЛСА) в виде последовательной цепи, состоящей из резистора, обладающего сопротивлением  $R$  и конденсатора, обладающего емкостью  $C$ .

Конденсатор предварительно заряжен до напряжения  $U_0$ . Источник питания отсутствует. Далее данную цепь обозначим R–C–0 [1]. Такая цепь наиболее адекватна задачам исследования, потому что позволяет промоделировать поведение ЛСА с диссипацией.

Приняты следующие допущения:

- элементы цепи обладают устойчивостью по отношению к энергетическим воздействиям и являются сосредоточенными элементами;
- переходные процессы при изменении законов  $U_C$  в различных структурах временных соотношений скомпенсированы.

Исходя из сделанных допущений, необходимо описать в динамике уход параметра  $U_C$  как в область отрицательного вещественного времени, так и в область положительного.

### Пути решения

Рассмотрим пути перехода  $U_C$  из одной временной структуры в другую (рис. 1). Момент времени  $t = 0, jt = 0$  соответствует началу отсчета времени  $t$  и  $jt$ . Процессы в системе начали диссипировать. До этого момента  $t < 0$ , что соответствует уходу системы в отрицательное вещественное время.

Предложены следующие пути перехода  $U_C$  из  $t_1$  в  $-t_1$ :

$$1) t \rightarrow t + jt \rightarrow -t + jt \rightarrow -t;$$

$$2) t \rightarrow t - jt \rightarrow -t - jt \rightarrow -t;$$

$$3) t \rightarrow -t.$$

Далее показано, что в структурах  $jt$  и  $t + jt$  присутствуют генерация и генерация с диссипацией без использования отрицательного сопротивления.

Возможно, генерация частично (или полностью) компенсирует процессы диссипации.

Рассмотрим аналитические выражения  $U_C$  всех путей перехода из  $t_1$  в  $-t_1$  для следующих структур.

Первый путь перехода из  $t_1$  в  $-t_1$ :

$$- \llcorner t \gg: t = 0, U_C(t) = U_0, U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}; t = t_1, U_C(t_1) = U_0 e^{-\frac{t_1}{RC}}.$$

$$- \llcorner t + jt \gg: U_C(t) = U_C(t_1) e^{-\frac{t+jt}{RC}}; t = t_2, U_C(t_2) = U_C(t_1) e^{-\frac{t_2+jt_2}{RC}}.$$

$$- \llcorner -t + jt \gg: U_C = U_C(t_2) e^{-\frac{t+jt}{RC}}; t = t_3, U_C(t_3) = U_C(t_2) e^{-\frac{t_3+jt_3}{RC}} = U_C(t_2) e^{-\frac{t_3-jt_3}{RC}}.$$

Имеет место генерация  $U_C$ , что эквивалентно включению отрицательного сопротивления вместо обычного.

$$- \llcorner -t \gg: t = t_4, U_C(t_4) = U_C(t_3) e^{-\frac{t_4}{RC}} = U_C(t_3) e^{-\frac{t_4}{RC}}.$$

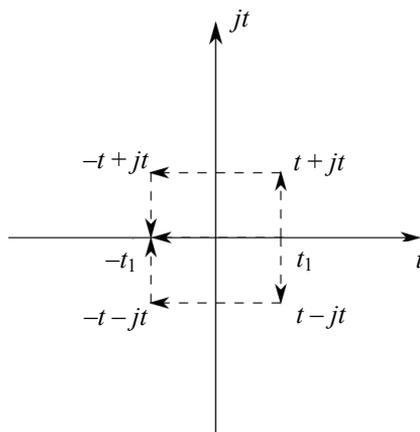


Рис. 1. Пути перехода из  $t_1$  в  $-t_1$

Имеет место генерация  $U_C$ , что эквивалентно включению отрицательного сопротивления вместо обычного.

Второй путь перехода из  $t_1$  в  $-t_1$ :

$$- \ll t \gg: t = 0, U_C(t) = U_0, U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$t = t_1, U_C(t_1) = U_0 e^{-\frac{t_1}{RC}}.$$

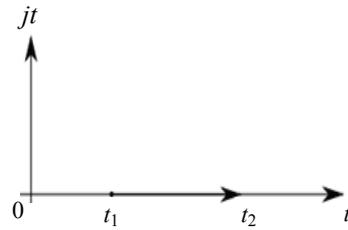


Рис. 2. Уход  $U_C$  в область положительного времени

$$- \ll t - jt \gg: U_C(t) = U_C(t_1) e^{-\frac{t-jt}{RC}}; t = t_2, U_C(t_2) = U_C(t_1) e^{-\frac{t_2-jt_2}{RC}}.$$

$$- \ll -t - jt \gg: U_C(t) = U_C(t_2) e^{-\frac{-t-jt}{RC}}; t = t_3, U_C(t_3) = U_C(t_2) e^{-\frac{t_3+jt}{RC}}.$$

$$- \ll -t \gg: U_C(t_1) = U_C(t_3) e^{-\frac{-t_1}{RC}} = U_C(t_3) e^{\frac{t_1}{RC}}.$$

В последних двух случаях имеет место генерация  $U_C$ , что эквивалентно подключению отрицательного сопротивления вместо положительного.

Третий путь перехода из  $t_1$  в  $-t_1$ :

$$- \ll t \gg: t = 0, U_C(t) = U_0, U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}; t = t_1, U_C(t_1) = U_0 e^{-\frac{t_1}{RC}}; t = -t_1,$$

$$U_C(t) = U_C(t_1) e^{-\frac{-t_1}{RC}} = U_C(t_1) e^{\frac{t_1}{RC}}.$$

Рассмотрим уход  $U_C$  в область положительного времени (рис. 2).

В момент  $t_1$  в исследуемой ЛСА сопротивление  $R$  заменяется на индуктивность  $L$ . Исчезает диссипация, и система остается в состоянии текущей накопленной энергии до момента  $t_2$ , пока вновь не произойдет обратная замена индуктивности  $L$  на сопротивление  $R$ :

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}; U_C(t_1) = U_0 e^{-\frac{t_1}{RC}};$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}; U_C(t_2) = U_C(t_1) \sin(\omega t_2).$$

## Результаты

В рассмотренных R-C-0 структурах за счет добавки  $jt$  появляется мнимая часть  $\text{Im}(U_C)$  [2], которую можно оценить аналитически, но оперировать при этом только с вещественной частью –  $\text{Re}(U_C)$ .

На переход из  $\text{Re}(U_C)$  в  $\text{Im}(U_C)$  и обратно положен запрет в виде разрушения ЛСА от энергетического воздействия, поскольку неизвестен закон такого перехода. Варьируя параметры  $U_0, R, C$ , получаем требуемые значения в  $\text{Re}(U_C)$ , соответствующие уходу в прошлое исследуемого параметра. Искусственный отрыв  $\text{Re}(U_C)$  от  $\text{Im}(U_C)$  позволяет обойтись только  $\text{Re}(U_C)$  без необходимости преодолевать запрет на переход из  $\text{Re}(U_C)$  в  $\text{Im}(U_C)$  и обратно.

Первая схема преобразования структур временных соотношений компенсирует уже случившиеся процессы диссипации (см. рис. 1), вторая – устраняет ее будущие процессы (см. рис. 2).

## Выводы

Структуры временных соотношений делятся (для исследуемой цепи R–C–0) на структуры с диссипацией и без нее.

Особенностями использования ЛСА для исследования структур временных соотношений является то, что они сужают исследуемые параметры и сводят их многообразию к  $U_C$  и току индуктивности  $i_L$ , а также  $U_0, R, L, C$ .

Во всех трех структурах есть вещественная часть исследуемого параметра  $U_C$ . Значит можно рассматривать наличие энергии в реальной части  $U_C$  во всех трех структурах.

Таким образом, необходимо вместо емкости использовать источник ЭДС, реализующий (формирующий) требуемый закон изменения  $U_C$ . Если в рассматриваемые временные интервалы выполняется данный закон, то это уход в требуемое время для  $U_C$ .

### Список литературы

1. 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.

2. Арнольд, В. И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений / В. И. Арнольд. – М. : Наука, 1978. – 304 с.

---

## Features of Using Linear Automation Systems for Research of Temporal Relation Structures

E. I. Algazin

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

**Keywords:** temporal relations; complex plane; linear automation system.

**Abstract:** A dynamic description of the behavior of the investigated parameter (voltage across the capacitor  $U_C$ ) given for the analysis of a linear automation system is proposed. The dynamics of the change in the structures of temporal relations is considered and a qualitative description of the investigated parameter in each of the structures is obtained. The transition of  $U_C$  in the region of negative and positive real time is investigated. An explanation is given for the absence of the need for control and “intrusion” of the investigated parameter  $U_C$  into the imaginary part of the real one.

### References

1. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotehniki i elektrotekhnicheskiye 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.)

2. Arnol'd V.I. *Dopolnitel'nyye glavy teorii obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy* [Additional chapters of the theory of ordinary differential equations], Moscow: Nauka, 1978, 304 p. (In Russ.)

## **Merkmale der Verwendung der linearen Automatisierungssysteme für die Forschung der Timing-Strukturen**

**Zusammenfassung:** Es ist die dynamische Beschreibung des Verhaltens des untersuchten Parameters (Spannung am Kondensator  $U_C$ ) für die Analyse eines linearen Automatisierungssystems vorgeschlagen. Es ist die Dynamik der Änderung der Strukturen der zeitlichen Beziehungen betrachtet und eine qualitative Beschreibung des untersuchten Parameters in jeder der Strukturen erhalten. Der Übergang von  $U_C$  im Bereich negativer und positiver reeller Zeit ist untersucht. Es ist die Erklärung für das Fehlen der Notwendigkeit der Kontrolle und "Invasion" des untersuchten Parameters  $U_C$  in den imaginären Teil des Realparameters gegeben.

---

## **Particularité de l'utilisation des systèmes d'automatisation linéaires pour l'étude des structures des relations temporelles**

**Résumé:** Est proposée une description dynamique du comportement du paramètre étudié (tension aux bornes du condensateur  $U_C$ ) pour l'analyse du système d'automatisation linéaire. Est examinée dans la dynamique du changement des structures des relations temporelles; est obtenue une description qualitative du paramètre étudié dans chacune des structures. Est étudiée la transition de l' $U_C$  dans le domaine du temps réel négatif et positif. Est expliquée l'absence du contrôle et d'intrusion du paramètre  $U_C$  étudié dans la partie imaginaire à partir de celle réelle.

---

**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.

**СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ И СПОСОБЫ  
ЕЕ АППРОКСИМАЦИИ. ЧАСТЬ 1. ЗАКОН ДАРСИ И НИЖНИЙ  
ПРЕДЕЛ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ. ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ  
В МИКРОПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

**Н. А. Меренцов<sup>1</sup>, В. А. Балашов<sup>1</sup>, А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>,  
М. В. Топилин<sup>2</sup>, А. В. Персидский<sup>3</sup>**

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
steerple@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; микропористая среда; режим течения; скорость фильтрации; фильтрационная кривая; фильтрационные течения; фильтрация.

**Аннотация:** Дано описание нижнего предела применения закона Дарси, который обусловлен воздействием ряда аномальных факторов, возникающих при фильтрационном течении жидкостей через слабопроницаемые мелкодисперсные среды. Рассмотрено влияние таких факторов, как действие сил межмолекулярного взаимодействия; граничные слои и смачиваемость поверхности; градиенты концентрации и электрического потенциала; присутствие в жидкости примесей; газонасыщение и парообразование; изменение структуры пористой среды, отдельно или в совокупности приводящие к нарушению закона Дарси.

---

Фильтрационные течения используются во многих промышленных технологических процессах и изделиях различных отраслей машиностроения, в технологиях и оборудовании химической промышленности и родственных ей производств [1 – 8]. Фильтрация используется в процессах водоподготовки и экологических технологиях [9 – 18]. Фильтрационные процессы являются неотъемлемой частью гидрологии и технологий добычи нефти и газа [19].

Несмотря на такое разнообразие, для вышеперечисленных процессов математические модели и основные закономерности фильтрационного течения, устанавливающие взаимосвязь между скоростью фильтрации и гидравлическим сопротивлением пористого слоя, одинаковые. Первоначальной информацией об исследуемом фильтрационном процессе является экспериментально получаемая зависимость градиента давления от скорости фильтрации  $\Delta P/H = f(v_f)$ , графическое представление которой называется фильтрационной кривой. Зависимости,

аппроксимирующие фильтрационную кривую в виде единого уравнения, всегда могут быть представлены в форме уравнений регрессии. Однако такие уравнения, достаточно точно отражая зависимость  $\Delta P/H = f(v_\phi)$ , не могут быть использованы для аналитического исследования различных гидродинамических ситуаций фильтрационного течения, которые могут встречаться в технологическом оборудовании и влиять как на его гидравлическое сопротивление, так и на протекающие в условиях фильтрационного течения тепло- и массообменные процессы.

Уточним основные понятия. Фильтрационная кривая – экспериментально получаемая графическая зависимость  $\Delta P/H = f(v_\phi)$ . Полная фильтрационная кривая – фильтрационная кривая, построенная в диапазоне изменения скорости фильтрации от ее нулевого значения до развитого турбулентного режима фильтрации. Неполная фильтрационная кривая – часть (участок) полной фильтрационной кривой, ограниченный в ее пределах диапазоном скоростей фильтрации, определяемым целью исследования или техническими возможностями экспериментальной установки. Развитый турбулентный режим фильтрации – режим фильтрации, при котором скорость фильтрации может быть определена с помощью квадратичного закона фильтрации. Аппроксимирующее уравнение – уравнение, представляющее фильтрационную кривую в форме математической зависимости (математическая модель фильтрационной кривой).

В реальных условиях нет необходимости в получении фильтрационной кривой в ее полном возможном диапазоне измерения скоростей фильтрации. Обычно исследования процесса фильтрации выполняются для областей фильтрационного течения, представляющих отдельные участки полной фильтрационной кривой. Диапазон скоростей фильтрации для построения таких участков фильтрационной кривой определяется целью исследования. При решении прикладных задач он может ограничиваться пределом скоростей, определяемым технологическим режимом работы установки или аппарата. При проведении научных исследований стремятся получить кривую фильтрации в более широком диапазоне скоростей фильтрации, чем требуется задачей исследования. Основными зависимостями, используемыми для аппроксимации отдельных участков фильтрационной кривой, являются закон Дарси, уравнение Козени–Кармана, степенные уравнения, квадратичный закон фильтрации и уравнение Дюпюи–Форхгеймера. Отдельные участки фильтрационной кривой могут быть аппроксимированы как одной из этих зависимостей, так и их совокупностью. В случае необходимости полная фильтрационная кривая может быть представлена как состоящая из отдельных участков. Выделение на полной фильтрационной кривой таких участков для аппроксимации разными зависимостями всегда осложняется трудностью определения границ их разделения, которые обусловлены тем, что смена гидродинамических условий внутрипорового течения между соседними участками осуществляется постепенно и плавно. Если при выполнении научных исследований данную границу по умолчанию иногда не принимают, ограничиваясь такими условиями, как «в области больших или малых скоростей» или «по мере увеличения или снижения скорости фильтрации», то при выполнении инженерных расчетов ее выбор должен быть обоснован.

Цель настоящего исследования – выявление условий, позволяющих обоснованно определять границы между соседними участками фильтрационной кривой, состоящей из отдельных участков, аппроксимируемых разными зависимостями.

Закон Дарси устанавливает взаимосвязь между расходом фильтрационного потока, движущей силой процесса и свойствами жидкости и пористой среды, через которую осуществляется фильтрационное течение. Одна из форм зависимости закона Дарси может быть представлена в виде

$$v_\phi = K \frac{\Delta P}{H}, \quad (1)$$

где  $v_\phi$  – скорость фильтрации, равная расходу жидкости через единицу площади фильтрационного потока в единицу времени;  $\Delta P/H$  – градиент давления, являющийся движущей силой процесса фильтрации и определяемый величиной потери давления  $\Delta P$  на участке потока длиной  $H$ ;  $K$  – коэффициент фильтрации, отражающий одновременно совокупное влияние свойств жидкости и структуры пористой среды на гидравлическое сопротивление фильтрационному течению.

Взаимонезависимость свойств жидкостей и структуры потока позволяет представить значение коэффициента фильтрации в виде выражения

$$K = \frac{k}{\mu}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости, учитывающий влияние только структуры пористой среды на фильтрационное течение;  $\mu$  – вязкость жидкости.

Закон Дарси запишем как [20]

$$v_\phi = \frac{k \Delta P}{\mu H}. \quad (3)$$

Закон Дарси находит широкое применение при проведении теоретических и экспериментальных исследований фильтрационных течений и решении прикладных задач. Однако существуют условия, при которых наблюдаются отклонения от закона Дарси, следствием чего является появление его различных модификаций в форме обобщенных уравнений. Недостатком таких уравнений является то, что отклонения закона Дарси от его линейного поведения в большинстве случаев компенсируются введением поправочных коэффициентов, не раскрывающих физическое содержание причин появления нелинейности, что не только ограничивает область их практического использования из-за требований к идентичности по структуре пористого слоя, но и снижает ценность использования при проведении теоретических исследований. Отклонение закона Дарси от линейной зависимости наблюдается как со стороны области малых скоростей фильтрации (нижний предел применения закона Дарси), так и со стороны их высоких значений (верхний предел применения закона Дарси).

Нижний предел применения закона Дарси обусловлен влиянием ряда аномальных факторов, возникающих при фильтрационном течении жидкостей через слабопроницаемые мелкодисперсные среды. Природа данных факторов обусловлена действием сил межмолекулярного взаимодействия на границе соприкосновения жидкостей с твердыми поверхностями, в результате чего в приграничной зоне образуются сольватные слои, свойства которых отличаются от остального объема жидкости. Слои обладают повышенной вязкостью и при течении в узких капиллярах обнаруживают некоторую сдвиговую прочность [21, 22], что позволяет применить к расчету движения таких жидкостей в пористой среде реологический закон вязкопластического течения. Согласно такому подходу к изучению фильтрации движение жидкости должно начаться в крупных порах и по мере увеличения градиента давления охватывать все более мелкие поры, распространяясь на весь объем пористой среды, что и приводит к нарушению выражаемой законом Дарси линейной зависимости между градиентом давления и скоростью фильтрации жидкости. В работе [23] аномально вязкое течение в узком капилляре представляется в виде модели стратифицированного трехслойного потока жидкостей с разной текучестью. Используя для оценки аномальной вязкой жидкости реологическое уравнение Шведова–Бингама, получено уравнение для обобщенного закона Дарси с переменным коэффициентом проницаемости, применение которого, однако, сопряжено с трудностями, связанными с определением реологических свойств протекающей в отдельных слоях аномально вязкой жидкости.

Граничные слои жидкости с реологической структурой потока, отличной от остального объема жидкости, образуются около гидрофильной хорошо смачиваемой поверхности. Ухудшение смачиваемости приводит к уменьшению граничных слоев. В случае лиофобных поверхностей при нарушении условий смачиваемости происходит скольжение жидкости относительно твердой поверхности, создавая тем самым видимость течения с меньшей, чем в основном объеме, вязкостью, что также становится причиной отклонения фильтрационного течения от закона Дарси [22].

К отклонениям от закона Дарси могут приводить и возникающие при фильтрации через тонкопористые среды градиенты концентрации и электрического потенциала. Наличие градиента концентрации приводит к развитию в фильтрационном потоке встречного капиллярно-осмотического течения, а явление электрического потенциала – к кажущемуся росту вязкости в результате торможения фильтрационного течения встречным электроосмосом [22].

Отклонения от закона Дарси могут быть вызваны присутствием в реальных жидкостях коллоидных частиц, полимерных молекул или иных примесей, в результате чего протекающие в тонкопористых средах жидкости становятся неньютоновскими. В то же время экспериментальные исследования показывают, что для чистых жидкостей закон Дарси в таких тонкопористых средах выполняется [20, 21].

Большое количество факторов, как видно, может порождать в фильтрационных течениях жидкостей через мелкопористые среды аномальные эффекты, отдельно или в совокупности приводящие к нарушению закона Дарси, поэтому невозможно точно указать размер пор, общий для всех случаев возможного нарушения данного закона. Ориентировочно для рассматриваемого режима фильтрации через мелкопористые слабопроницаемые среды, назовем его условно как «предламинарный» (микрокапиллярный), размер пор может находиться в пределах 0,03...100 мкм, при этом область меньших размеров пор характерна для эффектов физикохимической природы, а больших – для случаев, когда наличие ньютоновской жидкости примесей превращает ее в раствор, являющийся неньютоновской жидкостью.

Перечень рассмотренных эффектов, приводящих к аномалии фильтрационного течения в тонкопористых средах, неполный. Например, считалось, что структура пористой среды – жесткая, и ее свойства оставались неизменными во времени; фильтрующаяся жидкость изначально являлась ньютоновской и отсутствовали возникающие по разным причинам гистерезисные явления. Не рассматривались и такие факторы, как возможное газонасыщение и парообразование, влияние температуры на поведение жидкости и состояние пористой среды, фильтрация газов через мелкопористые слабопроницаемые среды и др. Множество разнообразных по природе и условиям проявления факторов затрудняет разработку общей теории микрокапиллярной фильтрации.

В каждом конкретном случае набор факторов по природе своего воздействия на гидродинамику микрокапиллярной фильтрации можно классифицировать по следующим признакам: области их принадлежности (природной или техногенной), особенности структуры пористой среды (является объектом естественного образования или промышленного производства), свойствам жидкости (химическим или реологическим). В соответствии с данной классификацией факторов оказывается возможным выделить отдельные направления для проведения локально ориентированных исследований в целях выявления закономерностей микрокапиллярной фильтрации и условий, когда использование уравнения Дарси в расчетах возможно, а когда приводит к недопустимым погрешностям. Такими направлениями, например, могут быть исследования микрокапиллярной фильтрации в химико-технологических и экологических процессах, тонкая очистка технических жидкостей, пропитка строительных материалов и изделий с волокнистой и мелкозернистой структурой и др. Наглядным примером такого подхода к исследованию и получению закономерностей аномального фильтрационного течения грунтовых вод в мелиоративной геологии может служить работа [23].

*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. 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. Вазинский, Н. Н. Лобачева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 608 – 614.
3. 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.
4. Эксергетический анализ и выбор энергосберегающих параметров импульсной регенерации фильтров, улавливающих пыль из сушильного агента / Ю. В. Красовицкий, Р. А. Вазинский, Е. В. Романюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 605 – 607.
5. 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.
6. 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
7. 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
8. 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.
9. Голованчиков, А. Б. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока : монография / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – 128 с.
10. Сергунин, А. С. Исследование динамики адсорбции и десорбции паров воды активным оксидом алюминия и цеолитом NaX / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 664 – 671.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Ломовцева, Е. Е. О пористой структуре гибридных сорбирующих материалов для осушки воздуха / Е. Е. Ломовцева, М. А. Ульянова, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 299 – 305.
17. 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.
18. Меренцов, Н. А. Моделирование тепломассообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения : монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 140 с.
19. 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.
20. Требин, Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах / Г. Ф. Требин ; под ред. И. М. Муравьева. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 157 с.
21. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 372 с.
22. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – М. : Наука, 1985. – 399 с.
23. Бондаренко, Н. Ф. Физика движения подземных вод / Н. Ф. Бондаренко. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 215 с.

---

**The Structure of Filter Curve and Methods of Its Approximation.  
Part 1. Darcy's Law and the Lower Limit of Its Application.  
Filtration of Liquids in Microporous Media**

**N. A. Merentsov<sup>1</sup>, V. A. Balashov<sup>1</sup>, A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>,  
M. V. Topilin<sup>2</sup>, A. V. Persidskiy<sup>3</sup>**

*Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production,  
steeple@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; microporous medium; flow regime; filtration rate; filtration curve; filtration currents; filtration.

**Abstract:** The description of the lower limit of the application of Darcy's law is given, which is due to the influence of a number of anomalous factors that arise during the filtration flow of liquids through low-permeability finely dispersed media.

The influence of such factors as the action of the forces of intermolecular interaction is considered; boundary layers and surface wettability; concentration and electric potential gradients; the presence of impurities in the liquid; gas saturation and vaporization; changes in the structure of the porous medium, separately or in the aggregate, leading to a violation of Darcy's law.

### 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. 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.)
3. 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.)
4. Krasovitskiy Yu.V., Vazhinskiy R.A., Romanyuk Ye.V., Lobacheva N.N., Arkhangel'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.)
5. 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.)
6. 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.)
7. 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.)
8. 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.)
9. 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: VolgGTU, 2018, 128 p. (In Russ.)
10. 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.)

11. 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], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2016, no. 2, pp. 23-31. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Rukhov A.V., Romantsova I.V., Tugolukov Ye.N. [Mathematical modeling of adsorption of cobalt ions by  $\text{Co}^{2+}$  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.)
13. 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], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2015, no. 10, pp. 15-23. (In Russ., abstract in Eng.)
14. 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. (In Russ., abstract in Eng.)
15. 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.)
16. 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.)
17. 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.
18. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Modelirovaniye teplomassoobmennyykh nasadochnyykh ustroystv s razvitym kapel'nyy rezhimom techeniya: monografiya* [Modeling of heat and mass transfer packed devices with a developed drip flow regime: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2019, 140 p. (In Russ.)
19. 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.)
20. 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.)
21. Churayev N.V. *Fizikokhimiya protsessov massoperenosa v poristykh telakh* [Physicochemistry of mass transfer in porous bodies], Moscow: Khimiya, 1990, 372 p. (In Russ.)
22. Deryagin B.V., Churayev N.V., Muller V.M. *Poverkhnostnyye sily* [Surface forces], Moscow: Nauka, 1985, 399 p. (In Russ.)
23. Bondarenko N.F. *Fizika dvizheniya podzemnykh vod* [Physics of groundwater movement], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 215 p. (In Russ.)

---

**Struktur der Filterkurve und Methoden ihrer Annäherung.  
Teil 1. Darcys Gesetz und die untere Grenze seiner Anwendungen.  
Filtration von Flüssigkeiten in mikroporösen Medien**

**Zusammenfassung:** Es ist die Beschreibung der unteren Grenze der Anwendung des Darcy-Gesetzes gegeben, die auf den Einfluss einer Reihe anomaler Faktoren zurückzuführen ist, die während des Filtrationsflusses von Flüssigkeiten durch

fein dispergierte Medien mit geringer Permeabilität auftreten. Es ist der Einfluss solcher Faktoren betrachtet, wie die Wirkung der Kräfte der intermolekularen Wechselwirkung; Grenzschichten und Oberflächenbenetzbarkeit; Konzentrations- und elektrische Potentialgradienten; das Vorhandensein von Verunreinigungen in der Flüssigkeit; Gassättigung und Verdampfung; Änderungen in der Struktur des porösen Mediums, die getrennt oder insgesamt zu einem Verstoß gegen Darcys Gesetz führen.

---

## **Structure de la courbe de filtration et méthodes d'approximation.**

### **Partie 1. Loi de Darcy et limite inférieure de son application.**

#### **Filtration de liquides dans des milieux microporeux**

**Résumé:** Est donnée une description de la limite inférieure de l'application de la loi de Darcy qui est due à l'influence d'un certain nombre de facteurs anormaux se produisant lors de la filtration des fluides à travers des milieux à petites particules faiblement perméables. Est examinée l'influence de tels facteurs que l'action des forces d'interaction inter-moléculaire; les couches limites et la mouillabilité de la surface; les gradients de concentration et de potentiel électrique; la présence d'impuretés dans le liquide; la saturation en gaz et la formation de vapeur; la modification de la structure du milieu poreux, entraînant une violation de la loi de Darcy.

---

**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 техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО ВЫХОДНОГО ПОТОКА АЦЕТАТЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПЛЕНОК ОТ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ

С. И. Лазарев<sup>1</sup>, А. А. Арзамасцев<sup>1</sup>, В. Ю. Рыжкин<sup>1</sup>, О. А. Ковалева<sup>1,3</sup>,  
Д. С. Лазарев<sup>1</sup>, В. М. Дмитриев<sup>2</sup>, Т. А. Хромова<sup>1</sup>

*Кафедры «Механика и инженерная графика» (1), kafedra\_mig@mail.ru; «Природопользование и защита окружающей среды» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ»; кафедра «Математическое моделирование и информационные технологии» (3), ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия*

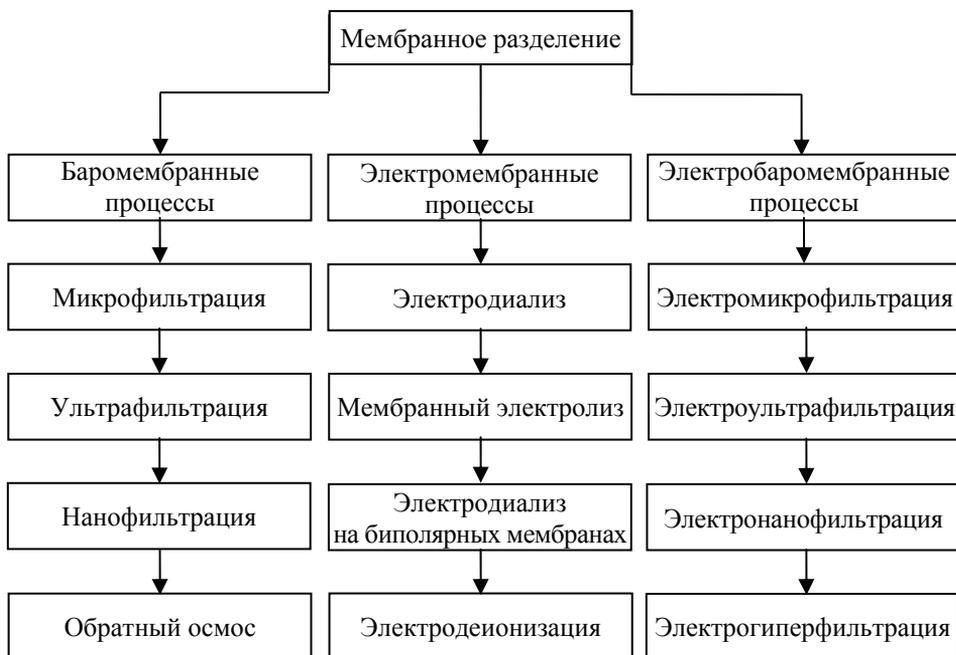
**Ключевые слова:** гальванотехника; мембрана; процесс; разделение; раствор; технология; электромембранный метод.

**Аннотация:** Представлено сравнительное исследование применения мембранных, электромембранных и электробаромембранных технологий для различных отраслей промышленности в области очистки сточных вод и технологических растворов. Сформулирован принцип классификации мембранных процессов разделения. Определены характерные периоды стимулирования переноса растворителя. На основе полученных экспериментальных данных по проницаемости растворителя через мембраны МГА-80П и МГА-95 предложены эмпирические зависимости, описывающие кинетические характеристики в зависимости от трансмембранного давления и температурного воздействия.

---

На основе анализа литературных данных методами разделения с помощью мембран являются [1 – 6]: обратный осмос; ультра- и микрофильтрация; разделение газов; электродиализ; диализ и др. Классификация процессов мембранного разделения растворов следующая: баромембранные (обратный осмос, нано-, ультра- и микрофильтрация); электромембранные (электродиализ, электроосмос и др.); электробаромембранные (электрогиперфильтрация, электронанофильтрация, электроультрафильтрация, электромикрофильтрация), движущими силами которых являются соответственно градиент давлений; градиент электрического потенциала; градиент давлений и градиент электрического потенциала (рис. 1) [1 – 6].

В работе проведен анализ укрупненных групп процессов мембранного разделения растворов, показано сравнение рассмотренных процессов мембранного разделения растворов по принципу действия движущей силы, которая накладывается на мембранный аппарат с размещенными в нем пористыми полупроницаемыми мембранами. Сравнительное исследование методов разделения растворов с применением мембран выявило, что наиболее распространенными, в настоящее время, являются процессы электромембранной очистки, что следует из литературных данных этой области. Хорошо зарекомендовавшими себя на производстве являются процессы баромембранного разделения растворов, а наиболее перспективными – электробаромембранные процессы [1 – 6].

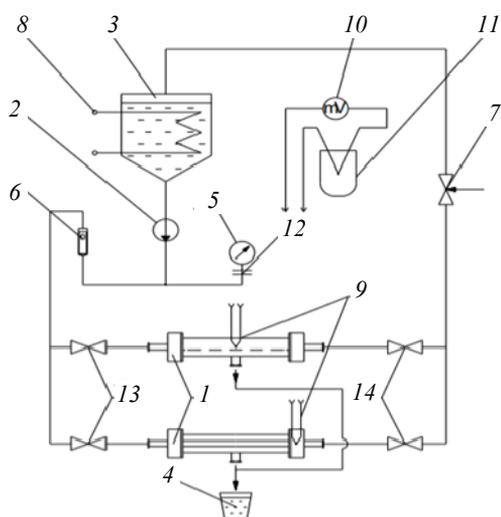


**Рис. 1. Классификация процессов мембранного разделения растворов**

Процесс фильтрации применяется для «грубой» фильтрации крупных частиц на следующих материалах: песке или кварце. Микрофильтрация – процесс разделения жидких, газовых смесей от частиц диаметром 100...0,1 мкм, который происходит в режиме с регенерацией обратным током жидкости или газа. Ультрафильтрация – процесс мембранного разделения, фильтрующий жидкость под действием перепада давления до и после мембраны при наличии высокомолекулярных соединений. Размер пор ультрафильтрационных мембран составляет 0,01...0,1 мкм. Мембранный электролиз – мембранный метод получения едкого натра и хлора, также называемый мембранным электролизом, основанный на электрохимическом разложении растворов хлорида натрия в электролизерах с твердым катодом и ионообменными (катионообменными) мембранами в качестве диафрагмы. Тем не менее необходимость решения новых задач приводит к поиску новых решений. В середине прошлого века созданы первый полупроводниковый диод и транзистор, и стали предприниматься попытки получения ионных аналогов данных электронных устройств. В это время появились так называемые биполярные мембраны, состоящие из двух (или более) слоев ионообменников, которые отличаются знаком электрического заряда катионообменных и анионообменных групп [1 – 6].

Рассмотрим установку, снабженную модулями микро- и ультрафильтрации для разделения исследуемых растворов (рис. 2). Основными элементами установки являются: насос, предназначенный для подачи разделяемого раствора в мембранные элементы с микро-, ультрафильтрационными пленками, при помощи которого создается давление; вентили, обеспечивающие регулирование давления в установке; термopара для контроля температурного режима осуществления процесса разделения; металлическая мембрана для предотвращения попадания раствора в движущие элементы манометра [7].

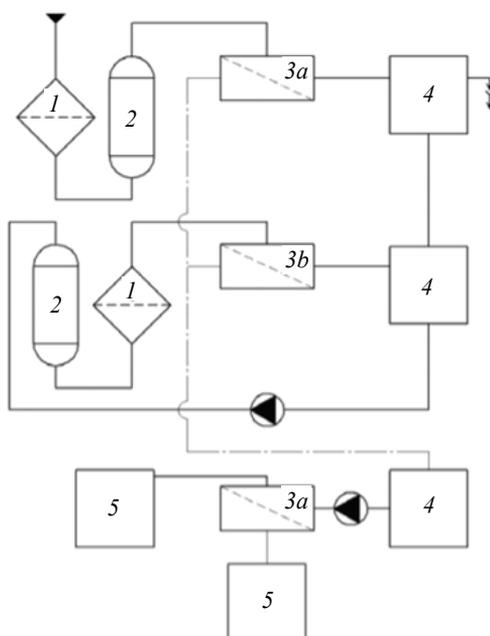
В работе [8] представлено исследование эффективности технологий переработки радиоактивно загрязненных растворов на основе коммерчески доступных гипер- и нанофильтрационных аппаратов в режиме гарантированного исключения



**Рис. 2. Прототип установки с последовательными процессами микрофильтрации, ультрафильтрации растворов:**

1 – мембранная ячейка; 2 – насос; 3 – питающий бак; 4 – бак для пермеата; 5 – манометр; 6 – ротаметр; 7 – вентиль регулировочный; 8 – змеевик; 9 –термопара; 10 – милливольтметр; 11 – сосуд Дьюара; 12 – разделитель; 13, 14 – вентили

переноса полизарядных металлов, обеспечивающих получение приемлемой для «вечной» изоляции формы радиоактивных отходов и вовлечение основной массы техногенно и радиоактивно загрязненных вод в промышленный оборот. Схема установки приведена на рис. 3. Система выполнена из двух ступеней, способных работать автономно.



**Рис. 3. Принципиальная схема установки:**

1 – микрофильтр; 2 – солерастворитель; 3a, 3b – гиперфильтрационный и нанофильтрационный (гиперфильтрационный) аппараты соответственно; 4, 5 – промежуточные и контрольные емкости соответственно

Первая ступень переработки включала в себя микрофильтр из волокнистого полипропилена стандарта SL-10' с декларированным размером пор 1,0 мкм, соле-растворитель для дозирования комплексона и гиперфильтрационный элемент Vontrop. Питательным раствором служила водопроводная вода сети г. Санкт-Петербурга, подаваемая на вход микрофильтра с допустимым для устойчивой работы элемента в режиме низконапорной гиперфильтрации давлением  $(0,32 \pm 0,02)$  МПа. Пермеат собирался в питательной емкости финишной ступени, а концентрат – в промежуточной емкости, снабженной переливным устройством для поддержания постоянного уровня питательного раствора, откуда самотеком передавался в питательную емкость второй ступени.

Вторая ступень представляла собой контур концентрирования биологически опасных компонентов и включала в себя: приемно-питательную емкость; питательный мембранный насос марки DLX с производительностью  $15 \text{ дм}^3/\text{ч}$  при давлении до 0,55 МПа; соле-растворитель для непрерывного дозирования лигандов; микрофильтр для защиты поверхности мембраны от вероятного механического воздействия образующихся в процессе дисперсных частиц [8].

В работе [9] представлена принципиальная схема обратноосмотической установки, состоящей из следующих основных элементов (рис. 4): емкости исходного раствора E1, пермеата E2 и концентрата E3; насосы высокого давления Н1, Н2; предварительные фильтры ФК1-2; мембранные разделительные модули ММ1-3. Установка оснащалась двухступенчатой системой мембранной очистки разделяемого раствора, причем на первой ступени установлены одновременно два мембранных модуля ММ1, ММ2, соединенных параллельно, а на второй – один ММ3.

Одними из наиболее распространенных аппаратов для мембранного разделения растворов являются электродиализаторы. Чаще всего такие аппараты состоят из следующих элементов (рис. 5): электродов, прокладок и ионообменных мембран (катионообменных и анионообменных мембран (МК, МА)), которые в свою очередь находятся в таком виде, чтобы между ними образовывалось не менее двух разделенных потоков. Электродиализ удаляет загрязняющие вещества путем пропускания исходного раствора через мембрану (на примере водного раствора). Установка электродиализного разделения растворов определяется комплексом технологических параметров, например, таких как схема установки, концентрация, свойства мембран, скорость потока, плотность тока. Эти понятия можно условно объединить в одно – производительность электродиализной установки. На примере переноса воды из разбавленного потока в поток концентрата можно говорить об эффективности процесса электродиализа [10].

Для исследования проницаемости использовалась экспериментальная установка, подробно представленная в работе [6]. Расчет коэффициента проницаемости по экспериментальным данным проводили по зависимости

$$\alpha = \frac{V}{F_m \tau P}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем собранного пермеата,  $\text{м}^3$ ;  $F_m$  – площадь рабочей поверхности пленки прямоугольного образца,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с;  $P$  – трансмембранное давление, МПа.

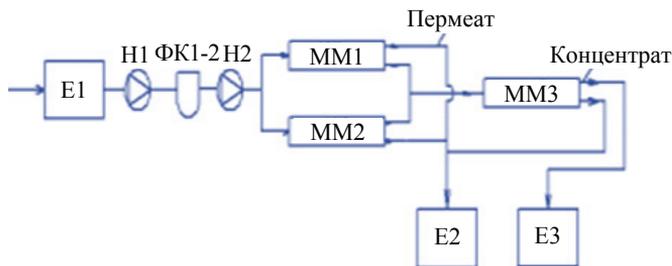
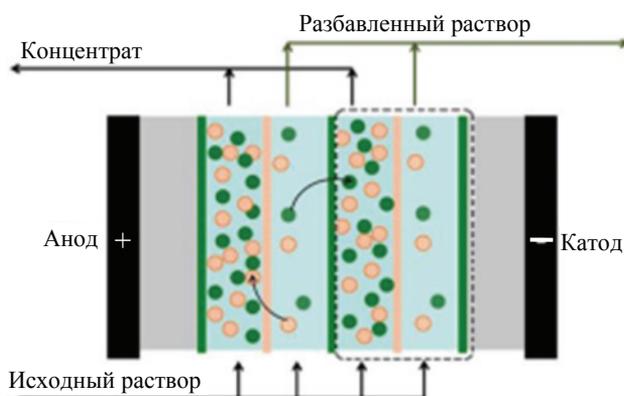


Рис. 4. Технологическая схема разделения сточной воды



**Рис. 5. Схема работы аппарата электродиализа:**  
 ● – анион; ● – катион; ■ – МК; ■ – МА

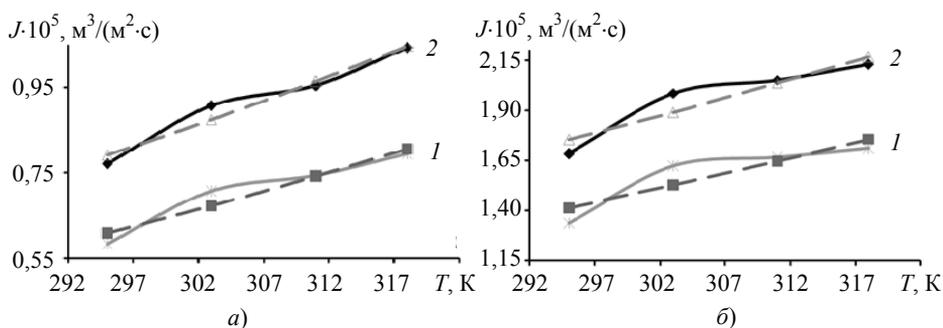
В экспериментальных исследованиях использовались образцы серийно выпускаемых пленок. Рабочие характеристики и свойства ацетатцеллюлозных пористых пленок приведены в табл. 1.

Трансмембранное давление является движущей силой баромембранного процесса, поэтому с ростом трансмембранного давления увеличивается производительность процесса мембранного разделения по растворителю. Исследование данных, приведенных для зависимостей удельного выходного потока от температурного воздействия и трансмембранного давления (рис. 6, кривые 1, 2), позволяет

Таблица 1

**Рабочие характеристики ацетатцеллюлозных пленок МГА-80П, МГА-95**

Размеры	Полупроницаемые пленки	
	МГА-95	МГА-80П
Трансмембранное давление $P$ , МПа	5,0	
Производительность по фильтрату при $T = 298\text{K}$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$9,16 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент задерживания, по 0,15 % NaCl	0,95	0,80
Рабочий диапазон, рН	3...8	
Максимальная температура, К	322	



**Рис. 6. Зависимости удельного выходного потока для ацетатцеллюлозных пленок МГА-95 (а) и МГА-80П (б) от температурного воздействия и трансмембранного давления, МПа:**

1 – 3; 2 – 4; — — эксперимент; --- — расчет

отметить, что с повышением температуры удельный выходной поток на небольшом интервале резко возрастает как для ацетатцеллюлозной пленки МГА-95, так и МГА-80П, а затем до температуры 318 К возрастает монотонно, о чем свидетельствует более плавный наклон кривой проницаемости в сторону возрастания.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные по гидродинамической проницаемости мембран для пористых пленок МГА-95, МГА-80П. Зависимости проницаемости через исследуемые ацетатцеллюлозные пористые пленки от температурного воздействия при выбранном диапазоне варьирования трансмембранного давления отличаются друг от друга, что, вероятно, свидетельствует о различной структуре активного слоя и подложки пленок (мембран), диаметра пор и их форме в поверхностном (активном) слое и поровом (межволоконном) пространстве подложки. Поры имеют различную форму и образуют сорбционное пространство мембраны. Вероятно, сорбционное пространство у МГА-80П выше, чем у МГА-95. Количественный анализ проницаемости мембран по воде также выше для МГА-80П, чем для МГА-95, что вызвано высокой скоростью поглощения воды материалом мембраны, то есть большей сорбционной способностью по воде для мембраны МГА-80П.

Кривые 1 и 2 удельного выходного потока и данные проницаемости представляют собой процесс повышения удельного выходного потока в зависимости от возрастания температурного воздействия, при прочих равных условиях, для исследуемых перегородок (см. рис. 6 и табл. 2). При начальном росте температуры на 10 °С отмечается возрастание потока по воде на ~ 18 %, что обусловлено структурными изменениями в ацетатцеллюлозном слое, а дальнейшее повышение температуры на 15 °С приводит к менее интенсивному возрастанию проницаемости на ~ 10 %. Подобные явления связаны с процессом структурной перестройки в активном слое и полимерной подложке для мембран МГА-95 и МГА-80П соответственно.

Таблица 2

**Зависимость проницаемости от температуры и трансмембранного давления для мембраны МГА-95, МГА-80П**

τ, с	Мембрана	T, К	P, МПа	$\alpha \cdot 10^5, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МПа})$		m	n
				эксперимент	расчет		
900	МГА-95	3,0	295	0,195	0,203	1,054	3,717
			303	0,236	0,225		
			311	0,248	0,247		
			318	0,265	0,269		
		4,0	295	0,193	0,198		
			303	0,227	0,219		
			311	0,239	0,241		
			318	0,261	0,262		
	МГА-80П	3,0	295	0,446	0,471	1,119	2,886
			303	0,541	0,509		
			311	0,556	0,548		
			318	0,570	0,585		
		4,0	295	0,421	0,438		
			303	0,496	0,473		
			311	0,512	0,509		
			318	0,532	0,541		

Из данных (см. рис. 6, табл. 2), процесс изменения  $J$  и  $\alpha$  от температурного воздействия и трансмембранного давления удовлетворительно описывается соответственно расчетными функциями с эмпирическими коэффициентами для гидродинамической проницаемости  $\alpha_{\text{расч}}$  и удельного выходного потока  $J_{\text{расч}}$ :

$$\alpha_{\text{расч}} = \frac{J_{\text{расч}}}{P}; \quad (2)$$

$$J_{\text{расч}} = m\alpha_0 P \left( \frac{T_0}{T} \right)^n, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – проницаемость по дистиллированной воде при 295 К,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МПа})$ ;  $T_0$  – комнатная температура, К.

Значения эмпирических коэффициентов  $m$ ,  $n$  и других расчетных параметров для уравнения (3) приведены в табл. 2.

Перспективность внедрения новых мембранных технологий востребована временем, поэтому существует необходимость в разработке конструкций аппаратов нового поколения, которые позволят снизить эффект концентрационной поляризации в тонких межмембранных каналах и осуществить процесс разделения растворов с получением приемлемых данных по проницаемости и удельному выходному потоку растворителя [11, 12].

### Заключение

Аналитический обзор современных методов и процессов разделения растворов с применением мембран позволил сформулировать принцип классификации мембранных процессов разделения. Эксперименты по изучению поведения гидродинамической проницаемости мембран от трансмембранного давления и температурного воздействия показывают характерные периоды переноса растворителя.

Первоначальный рост температуры на 10 °С стимулирует возрастание потока воды на ~ 18 %. Данный факт объясняется структурными изменениями в ацетатцеллюлозном слое. Дальнейшее возрастание температуры на 15 °С приводит к менее интенсивному возрастанию проницаемости на ~ 10 %. Подобные явления связаны с процессом структурной перестройки в активном слое и полимерной подложке мембран для МГА-95 и МГА-80П соответственно. На основе полученных экспериментальных данных по проницаемости растворителя через мембраны МГА-80П и МГА-95 предложены эмпирические зависимости кинетических характеристик от трансмембранного давления и температурного воздействия.

### Список литературы

1. Сравнительное исследование методов разделения технологических растворов и сточных вод гальванических производств / О. А. Ковалева, С. И. Лазарев, Д. Н. Коновалов, С. В. Ковалев // Вестн. Техн. ун-та. – 2018. – Т. 21, № 5. – С. 58 – 63.
2. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях / О. А. Абоносимов, М. А. Кузнецов, О. А. Ковалева [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641 – 655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655
3. Пат. 2522882 Российская Федерация, МПК В01Д 61/42. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / С. В. Ковалев, С. И. Лазарев, О. А. Абоносимов, О. А. Соломина, К. С. Лазарев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2013117190/05; заявл. 15.04.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 17 с.

4. Анализ морфологии поверхности микрофильтрационных мембран МФФК, МПС методом атомной силовой микроскопии / О. А. Ковалева, С. И. Лазарев, И. А. Осипова [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 608 – 615.
5. Ковалева, О. А. Разделение послеспиртовой мелассной барды на пористых мембранах УФМ-50<sup>®</sup>, УПМ-50М<sup>®</sup>, ОПМН-П<sup>®</sup> и ОФАМ-К<sup>®</sup> / О. А. Ковалева, С. В. Ковалев // Мембраны и мембранные технологии. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 213 – 224. doi: 10.1134/S221811721703004X
6. Ковалева, О. А. Влияние трансмембранного давления на микрофильтрационное концентрирование дрожжевой биомассы / О. А. Ковалева, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев // Мембраны и мембранные технологии. – 2017. – Т. 7, № 5. – С. 358 – 368. doi: 10.1134/S2218117217050042
7. Тимкин, В. А. Исследование и разработка баромембранных процессов производства творога в последовательности «микрофильтрация – ультрафильтрация» / В. А. Тимкин // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 6 (173). – С. 44 – 58.
8. Чугунов, А. С. Нанофильтрационное фракционирование компонентов радиоактивных растворов – метод сокращения объема изолируемых отходов / А. С. Чугунов, В. А. Винницкий // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 51 – 61. doi: 10.26583/npe.2019.1.05
9. Шитова, В. О. Особенности очистки сточных вод от двухвалентных металлов высоконапорным обратным осмосом / В. О. Шитова // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – Т. 28, № 2 (151). – С. 8 – 11.
10. Джубари, М. К. Эффективность электродиализа при очистке промышленных сточных вод / М. К. Джубари, Н. В. Алексеева // Вестник Техн. ун-та. – 2020. – Т. 23, № 7. – С. 33 – 39.
11. Коэффициенты диффузионной проницаемости кальция серноокислого через мембранные элементы трубчатого вида / С. И. Лазарев, В. В. Мамонтов, С. В. Ковалев, К. С. Лазарев // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 120 – 122.
12. Ковалев, С. В. Методика исследования гидродинамической проницаемости мембран от градиента давления и температуры / С. В. Ковалев // Мембраны и мембранные технологии. – 2013. – Т. 3, № 3. – С. 191 – 198. doi: 10.1134/S2218117213030061

---

## **The Study of the Correlation between a Specific Output Flow of Acetate Cellulose Films and the Pressure Gradient, Temperature and Classification of the Processes of Membrane Separation of Solutions**

S. I. Lazarev<sup>1</sup>, A. A. Arzamastsev<sup>1</sup>, V. Yu. Ryzhkin<sup>1</sup>, O. A. Kovaleva<sup>1,3</sup>,  
D. S. Lazarev<sup>1</sup>, V. M. Dmitriev<sup>2</sup>, T. A. Khromova<sup>1</sup>

*Department of Mechanics and Engineering Graphics (1), kafedra\_mig@mail.ru;  
“Nature Management and Environmental Protection” (2), TSTU;  
Department of Mathematical Modeling and Information Technologies (3),  
Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

**Keywords:** electroplating; membrane; process; separation; solution; technology; electromembrane method.

**Abstract:** A comparative study of the application of membrane, electromembrane and electrobaromembrane technologies for various industries in the field of wastewater treatment and technological solutions is presented. The principle

of classification of membrane separation processes is formulated. The characteristic periods of the solvent transfer stimulation were determined. Based on the experimental data obtained on the permeability of the solvent through the MGA-80P and MGA-95 membranes, empirical dependences are proposed that describe the kinetic characteristics of the dependence from transmembrane pressure and temperature effects.

### References

1. Kovaleva O.A., Lazarev S.I., Konovalov D.N., Kovalev S.V. [Comparative study of methods of separation of technological solutions and waste waters of galvanic industries], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2018, vol. 21, no. 5, pp. 58-63. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependences and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater at enterprises], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kovalev S.V., Lazarev S.I., Abonosimov O.A., Solomina O.A., Lazarev K.S. *Elektrobaromembrannyy apparat rulonnogo tipa* [Electrobaromembrane roll-type apparatus], Russian Federation, 2014, Pat. 2522882 (In Russ.)
4. Kovaleva O.A., Lazarev S.I., Osipova I.A., Kovalev S.V., Polyanskiy K.K. [Analysis of the surface morphology of microfiltration membranes MPFK, MPS by atomic force microscopy], *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2017, vol. 17, no. 4, pp. 608-615. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kovaleva O.A., Kovalev S.V. [Separation of post-alcohol molasses stillage on porous membranes UFM-50<sup>®</sup>, UPM-50M<sup>®</sup>, OPMN-P<sup>®</sup> and OFAM-K<sup>®</sup>], *Membrany i membrannyye tekhnologii* [Membranes and membrane technologies], 2017, vol. 7, no. 3, pp. 213-224, doi: 10.1134/S221811721703004X (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kovaleva O.A., Lazarev S.I., Kovalev S.V. [Influence of transmembrane pressure on microfiltration concentration of yeast biomass], *Membrany i membrannyye tekhnologii* [Membranes and membrane technologies], 2017, vol. 7, no. 5, pp. 358-368, doi: 10.1134/S2218117217050042 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Timkin V.A. [Research and development of baromembrane processes for the production of cottage cheese in the sequence "microfiltration - ultrafiltration"], *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2018, no. 6 (173), pp. 44-58. (In Russ.)
8. Chugunov A.S., Vinnitskiy V.A. [Nanofiltration fractionation of components of radioactive solutions - a method for reducing the volume of isolated waste], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika* [Izvestiya vysshikh educational institutions. Nuclear energy], 2019, no. 1, pp. 51-61, doi: 10.26583/npe.2019.1.05 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Shitova V.O. [Features of wastewater treatment from divalent metals by high-pressure reverse osmosis], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2014, vol. 28, no. 2 (151), pp. 8-11. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Dzhubari M.K., Alekseyeva N.V. [Efficiency of electrodialysis in industrial wastewater treatment], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2020, vol. 23, no. 7, pp. 33-39. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Lazarev S.I., Mamontov V.V., Kovalev S.V., Lazarev K.S. [Coefficients of diffusion permeability of calcium sulfate through membrane elements of tubular type], *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. 120-122. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Kovalev S.V. [Methods for studying the hydrodynamic permeability of membranes from the pressure and temperature gradient], *Membrany i membrannyye tekhnologii* [Membranes and membrane technologies], 2013, vol. 3, no. 3, pp. 191-198, doi: 10.1134/S2218117213030061 (In Russ.)

---

### **Untersuchung der Abhängigkeit des spezifischen Ausgangsflusses der Acetatcellulose-Folien von Druckgradienten, Temperatur und Klassifizierung der Membrantrennverfahren**

**Zusammenfassung:** Es ist eine vergleichende Studie zum Einsatz von Membran-, Elektromembran- und Elektrobarmembrantechnologien für verschiedene Branchen im Bereich Abwasserbehandlung und technologische Lösungen vorgestellt. Das Prinzip der Klassifizierung von Membrantrennprozessen ist formuliert. Die charakteristischen Perioden der Lösungsmitteltransferstimulation sind bestimmt. Auf der Grundlage der erhaltenen experimentellen Daten zur Permeabilität des Lösungsmittels durch die MGA-80P- und MGA-95-Membranen sind empirische Abhängigkeiten vorgeschlagen, die die kinetischen Eigenschaften der Abhängigkeit von Transmembrandruck- und Temperatureffekten beschreiben.

---

### **Étude de la dépendance du flux de la sortie spécifique des films d'acétate de cellulose du gradient de la pression, de la température et de la classification des processus de la séparation membranaire des solutions**

**Résumé:** Est présentée une étude comparative des applications des technologies membranaires, électromembranaires et électrobarmembranaires pour diverses industries dans le domaine du traitement des eaux usées et des solutions technologiques. Est formulé le principe de la classification des processus de la séparation membranaire. Sont déterminées les périodes caractéristiques de la stimulation du solvant. A la base des données expérimentales sur la perméabilité du solvant à travers les membranes MGA-80P et MGA-95, sont proposées des dépendances empiriques décrivant les caractéristiques cinétiques en fonction de la pression transmembranaire et de l'exposition à la température.

---

**Авторы:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; *Арзамасцев Александр Анатольевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Рыжкин Владимир Юрьевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Ковалева Ольга Александровна* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; профессор кафедры «Математическое моделирование и информационные технологии», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина»; *Лазарев Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Хромова Татьяна Александровна* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В ДИСКОВОМ ГОМОГЕНИЗАТОРЕ-ДИСПЕРГАТОРЕ

**З. А. Алхило, А. А. Баранов, В. Мансур,  
Е. Н. Туголуков, А. А. Пасько, В. Ф. Першин**

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,  
pershin.home@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** графит; малослойный графен; многослойный графен; смазка; смешивание; цепи Маркова.

**Аннотация:** Исследовано движение вязкой жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками и дано математическое описание для плоских и ступенчатых дисков. На основе математического аппарата случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени, создана модель процесса смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами в роторном гомогенизаторе-диспергаторе. Декомпозиция процесса и рассмотрение отдельно процессов смешивания в радиальном и окружном направлениях позволило оценить их интенсивность и выработать рекомендации для перехода от лабораторных установок к промышленным аппаратам.

---

### Введение

Новый интерес к материалам, которые могут быть получены из графита, возник как только был получен графен и определены его уникальные физико-механические характеристики. Экспериментально установлено, что один слой графена, выращенного на стали, выдерживает 6 400 циклов скольжения, тогда как малослойный графен (состоящий из 3–4 слоев) выдерживает 47 000 циклов. Кроме того, показано, что данные графеновые слои полностью останавливают износ, несмотря на сложные условия скольжения, включая высокие контактные давления ( $\approx 0,5$  ГПа), которые обычно наблюдаются в мелкомасштабных испытаниях [1]. В работе [2] графен готовили методом жидкофазной эксфолиации графита, а затем методом микрофлюидизации его равномерно диспергировали в смазочном масле SAE 10W-30. Смазочные масла без графена и с различными его концентрациями испытаны на трибометре со штифтом на диске при высоком удельном давлении 10 МПа и низкой линейной скорости 0,3 м/с. После испытаний царапины на дисках наблюдали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и трехмерной 3D-системы поверхностной метрологии. Масло с 0,05 масс.% графена показало минимальный коэффициент трения, самую низкую удельную износостойкость и малейшее царапание. Результаты выявили, что графен, диспергированный в масле SAE 10W-30 с оптимальной концентрацией, улучшил антифрикционные и противоизносные характеристики.

В работе [3] отмечается, что при использовании масла с графеновыми пластинами обычно не достигается желаемой смазывающей способности из-за плохой совместимости поверхности раздела графена и базового масла, особенно в жестких условиях трения. Для изготовления модифицированного фосфата гра-

фенового геля применен простой метод механического измельчения. Приготовленный гель продемонстрировал хорошую термостабильность, дисперсность и трибологические свойства даже в условиях высоких нагрузки и температуры. Анализ поверхности трения показал наличие многоплочной структуры, которая обладает хорошим синергетическим смазывающим эффектом, тем самым улучшая трибологические характеристики.

Результаты трибологических испытаний показали, что многослойный графен способен значительно снизить износ и коэффициент трения (COF) стали 440С во время начального режима скольжения и в условиях низкой нагрузки [4]. В частности, COF был уменьшен с 1,0 (для стали без покрытия) до 0,15 – для стали, покрытой низкой концентрацией графеновых хлопьев. Такие низкие значения COF сохранялись в течение тысяч проходов скольжения, даже если слои графена, образованные на поверхностях скольжения, не были непрерывными или непрерывно пополняемыми; содержали несколько листов графена. Скорость износа стальных испытательных пар также уменьшалась (на два порядка), несмотря на очень спорадическую и тонкую природу графеновых слоев. Очевидно, низкое трение и уменьшение износа обусловлено тем, что графен, как двумерный материал, легко сдвигается на поверхности скользящего контакта и, следовательно, обеспечивает низкое трение.

В обзоре [5] представлены результаты определения коэффициента трения смазок, модифицированных углеродными наноматериалами, в том числе графеновыми пластинами. Проведенный анализ показал, что концентрации модификатора изменялись от 0,03 до 3 %, а коэффициент трения – от 0,08 до 0,18. Такие широкие диапазоны обусловлены двумя основными причинами:

- отсутствует четкий контроль за качеством графеновых пластин (числом графеновых слоев, латеральными размерами, наличием дефектов и т.д.);
- не контролируется равномерность распределения графеновых пластин по объему смазки.

Использование малослойного и многослойного графенов в качестве модификатора пластичных смазок существенно повышает их трибологические характеристики [6, 7].

При переходе от лабораторных способов модифицирования смазок графеновыми пластинами к промышленным технологиям, необходимо прогнозировать не только качество графеновых пластин, но и неоднородность смеси данных пластин со смазкой. Рассмотрим один из вариантов решения второй проблемы, путем моделирования процесса смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами.

### Объект моделирования

Процесс смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами осуществляется в дисковом гомогенизаторе-диспергаторе. Ранее предложена экологически чистая и безотходная технология производства графеносодержащих масляных суспензий и модифицирования ими пластичных смазок [8]. В соответствии с данной технологией, графеносодержащая масляная суспензия производится из графита, предварительно механоактивированного в стержневой барабанной мельнице в роторном аппарате с подвижными лопастями. Данная суспензия проходит через фильтр грубой очистки для удаления частиц графита и фильтр тонкой очистки для получения масляного концентрата графеновых пластин. Финишной операцией такой технологии является операция смешивания пластичной смазки с графеновым концентратом в роторном гомогенизаторе-диспергаторе со ступенчатым диском (рис. 1).

Гомогенизатор состоит из ступенчатого диска (ротора) 1, статора 2, патрубка для подачи смеси 3. Смешивание вязкой жидкости с графеновыми пластинами осуществляется следующим образом. Пластическую смазку с графеновым концентратом

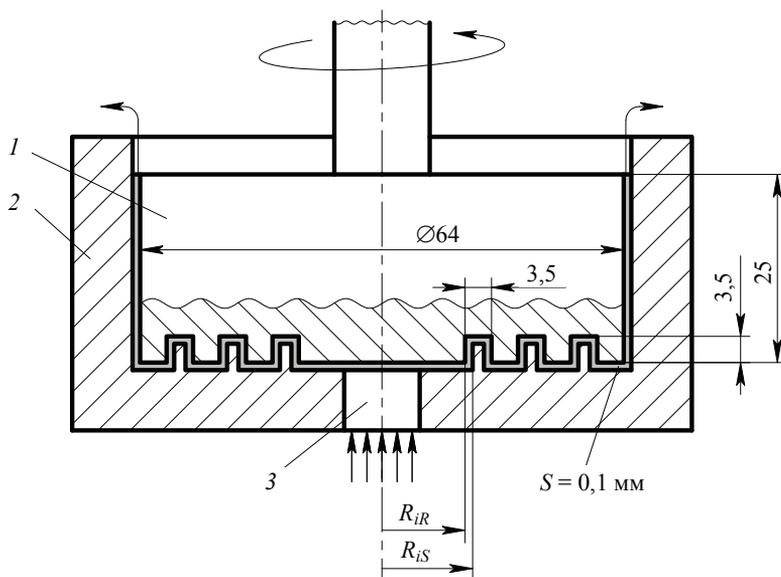


Рис. 1. Схема гомогенизатора со ступенчатым диском

предварительно смешивают с помощью лабораторной лопастной мешалки. Содержание графеновых пластин не превышает 1 масс.%. Насосом смесь подают в патрубок 3 при вращающемся диске 1. По сравнению с плоским диском в данном случае добавились вертикальные участки, на которых смесь движется по винтовым траекториям.

Таким образом, объектом моделирования является процесс смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами при совместном движении в малом зазоре между неподвижным и вращающимся ступенчатыми дисками. Прежде чем перейти к моделированию процесса, необходимо рассмотреть движение вязкой жидкости в указанном малом зазоре.

#### Движение вязкой жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками

При математическом описании движения вязкой жидкости, как правило, на основе общих уравнений сохранения движения, массы и энергии записываются дифференциальные уравнения течения. Далее, используя постоянство температуры жидкости, исходная система преобразуется в систему уравнений, состоящую из уравнений неразрывности в стационарной постановке и уравнения Навье–Стокса.

В рассматриваемой конструкции движение вязкой жидкости происходит на горизонтальных и вертикальных участках. На горизонтальных участках движение можно рассматривать по классической схеме зазора между неподвижной и движущейся плоскими пластинами.

В работе [9] дано математическое описание движения вязкой жидкости между плоскими дисками и рассмотрена схема, представленная на рис. 2.

Для нахождения траектории движения элементарного объема записаны следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{dr(\tau)}{d\tau} = \frac{V}{2\pi r(\tau)h}; \quad (1)$$

$$r(\tau) \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \frac{\omega r(\tau)x}{h}, \quad (2)$$

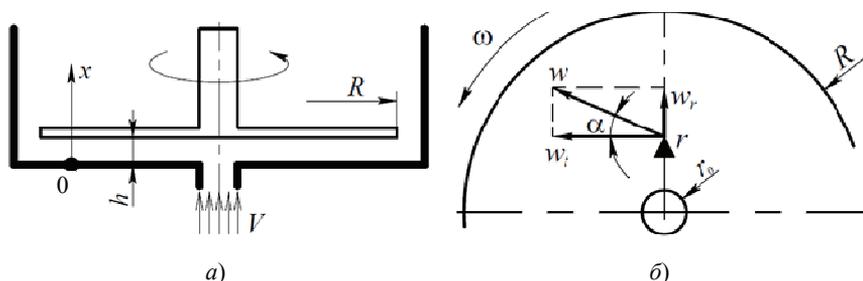


Рис. 2. Схема к определению параметров движения элементарного объема вязкой жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся плоскими дисками: а – поперечном сечении аппарата; б – плоскости зазора

где  $r(\tau)$ ,  $\varphi(\tau)$  – радиальная, м, и угловая, рад., текущие координаты соответственно;  $h$  – величина зазора, м;  $V$  – производительность, м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора, с<sup>-1</sup>.

При граничных условиях  $r(0) = r_0$ ,  $\varphi(0) = \varphi_0$ , получены следующие решения:

$$r(\tau) = \frac{\sqrt{\pi h(V\tau + r_0^2 \pi h)}}{\pi h}; \quad (3)$$

$$\varphi(\tau) = \varphi_0 + \frac{\omega x \tau}{h}, \quad (4)$$

где  $x$  – координата элементарного объема, м (см. рис. 2, а).

Используя решения (3) и (4), легко получить траектории частиц и элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками с различными характеристиками потока и геометрией. Кроме того, можно рассчитать время пребывания частицы в зазоре и путь, пройденный ей между дисками. С помощью математического пакета Maple получены характерные траектории движения элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками с различными расходными характеристиками и геометрией, а также значения расчетной скорости, время пребывания и путь, пройденный элементарным объемом, в зависимости от начальной координаты и положения в зазоре. Экспериментальные исследования на лабораторной установке с диаметром диска 60 мм при скоростях вращения 300...1 500 об./мин показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных значений.

На вертикальных участках движение вязкой жидкости в малом зазоре рассмотрим как движение между неподвижным и вращающимся цилиндром при следующих допущениях:

- жидкость несжимаемая;
- режим движения жидкости в радиальном зазоре ламинарный;
- влиянием силы тяжести пренебрегаем;
- поле скоростей в ламинарном зазоре осесимметрично;
- расход жидкости через аппарат постоянный во времени.

Используем уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрических координатах [10]. С учетом сделанных допущений, уравнения принимают вид:

$$W_r(r) \frac{dW_r(r)}{dr} - \frac{W_\varphi^2(r)}{r} = \nu \left( \frac{d^2 W_r(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_r(r)}{dr} - \frac{W_r(r)}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dP(r)}{dr}; \quad (5)$$

$$R_0 \leq r \leq R_1;$$

$$W_r(r) \frac{dW_\varphi(r)}{dr} + \frac{W_\varphi(r)W_r(r)}{r} = \nu \left( \frac{d^2W_\varphi(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_\varphi(r)}{dr} - \frac{W_\varphi(r)}{r^2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{dW_r(r)}{dr} + \frac{W_r(r)}{r} = 0, \quad (7)$$

где  $W_r$ ,  $W_\varphi$  – соответственно радиальная и окружная компоненты скорости, м/с;  $\rho$ ,  $\nu$  – соответственно плотность, кг/м<sup>3</sup>, и кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с, жидкости;  $P$  – давление, Па;  $R_0$ ,  $R_1$  – соответственно внутренний и внешний радиусы радиального зазора на рассматриваемом участке, м.

Граничные условия имеют вид:

$$W_\varphi(R_0) = W_0, \quad W_\varphi(R_1) = 0; \quad (8)$$

$$W_r(R_0) = W_1, \quad W_r(R_1) = \frac{R_0 W_1}{R_1}, \quad (9)$$

где  $W_0 = \omega R_0$  – окружная скорость рабочей поверхности ротора, м/с;  $W_1$  – радиальная скорость, определяемая расходом жидкости через роторно-импульсный аппарат, м/с.

В результате решения получаем:

$$W_\varphi(r) = \frac{R_0 W_0}{R_0^{2+k} - R_1^{2+k}} \left( r^{1+k} - \frac{R_1^{2+k}}{r} \right); \quad (10)$$

$$\frac{dW_\varphi(r)}{dr} = \frac{R_0 W_0}{R_0^{2+k} - R_1^{2+k}} \left( (1+k)r^k + \frac{R_1^{2+k}}{r^2} \right). \quad (11)$$

Зависимости (10) и (11) описывают движение элементарного объема смеси на вертикальных участках дискового гомогенизатора. Таким образом, разделив путь элементарного объема на горизонтальные и вертикальные участки (рис. 1), по уравнениям (3), (4), (10) и (11) можно найти радиальные и окружные скорости элементарных объемов и их траектории, что необходимо для построения математической модели.

### Математическая модель процесса смешивания

Процессы смешивания относятся к вероятностным или случайным процессам [11, 12]. Это в полной мере относится к процессу смешивания (гомогенизации) вязкой жидкости (пластичной смазки) и графеновых пластин. Действительно, графеновые пластины отличаются друг от друга числом графеновых слоев, латеральными размерами и формой, поэтому их перемещение в жидкости случайны. Доминирование случайности в свойствах и поведении частиц требует применения вероятностных моделей для описания проходящих в них процессов. Одним из замечательных математических аппаратов для описания эволюции систем со случайными свойствами является теория цепей Маркова.

Математическая модель никогда не претендует на полное исчерпывающее описание какого-либо процесса. Она строится для того, чтобы прогнозировать характер данного процесса при изменении большего или меньшего числа его параметров. Учитывая данные обстоятельства, воспользуемся самым простым видом цепей Маркова – однородных, одномерных, дискретных в пространстве

и времени. В соответствии со стратегией системного подхода рассмотрим качественную картину процесса на разработанной и изготовленной модельной установке, состоящей из двух прозрачных дисков (рис. 3).

Верхний диск неподвижен, а нижний соединен с приводом вращения. В центре верхнего диска установлен шприц для подачи пластичной смазки и графенового концентрата. Расстояние между дисками менее 1 мм. Сначала заполнили весь зазор графеновым концентратом, а затем начали подавать чистую смазку. В центре дисков образовался круг из чистой смазки. Когда продолжили подачу смазки, круг увеличился, и граница раздела графенового концентрата и смазки стала менее четкой. Это означает, что смешивание в радиальном направлении есть, но очень медленное. Для того чтобы исследовать качественный характер смешивания в окружном направлении, сначала заполнили весь зазор графеновым концентратом, а затем в круговом секторе (примерно  $45^\circ$ ) убрали концентрат и заменили его чистой смазкой. После завершения данной процедуры включили привод вращения нижнего диска. При повороте диска примерно на  $60^\circ$  вся чистая смазка перемешалась с графеновым концентратом, что говорит об очень интенсивном смешивании в окружном направлении.

При создании математической модели, прежде всего, пространство моделирования (зазор между неподвижным и вращающимся дисками) надо разделить на ячейки с равными объемами (рис. 4, а).

По высоте каждой ячейки выделили три участка (рис. 4, б). На этих участках будут разные скорости и в радиальном направлении (рис. 4, в) и в окружном (рис. 4, г). Учитывая принцип суперпозиции сил, можно рассмотреть отдельно движение и смешивание (марковская цепь) в радиальном направлении (рис. 4, д) и окружном (рис. 4, е).

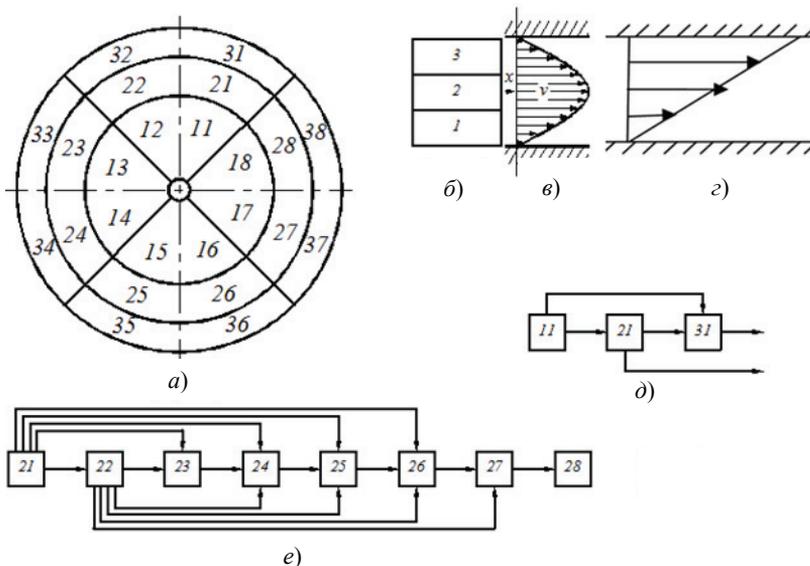
Состояние системы после перехода  $j$  представлено вектором состояния  $S(j)$

$$S(j) = \{c(1, j), c(2, j), c(3, j), \dots, c(i, j), \dots, c(N, j)\}, \quad (12)$$

где  $c(i, j)$  – концентрация графена в ячейке  $i$  после перехода  $j$ ;  $N$  – общее число ячеек.



Рис. 3. Модельная установка



**Рис. 4. Схемы к математической модели:**

*a* – разделение пространства моделирования на ячейки с равными объемами; *б* – деление элементарного объема на участки; *в*, *г* – эпюры скоростей в радиальном и окружном направлениях соответственно; *д*, *е* – марковские цепи в радиальном и окружном направлениях соответственно

Изменения состояния системы отображено следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 S(1) &= S(0) \times P; \\
 S(2) &= S(1) \times P; \\
 \dots\dots\dots \\
 S(j) &= S(j-1) \times P; \\
 \dots\dots\dots \\
 S(k) &= S(k-1) \times P,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где  $S(j)$  – вектор состояния системы после перехода  $j$ ;  $P$  – матрица переходных вероятностей;  $k$  – номер перехода, на котором заканчивается процесс.

Матрица переходных вероятностей имеет ту же размерность, что и вектор, а ее элементы равны вероятностям перехода графена из одних ячеек в другие. Элементы матрицы переходных вероятностей, то есть вероятности перехода графеновых пластин могут быть одинаковыми или разными на разных переходах. Учитывая, что концентрация графеновых пластин в смазке не превышает 1 масс.%, использовали более простой вариант с матрицей переходных вероятностей, постоянной на всех переходах.

### Проведение модельных численных экспериментов

Для наглядности будем рассматривать отдельно смешивание в радиальном и окружном направлениях. Тогда на каждом переходе системы из одного состояния в другое будет сначала осуществляться процесс смешивания в радиальном направлении, а затем в окружном. Внесем изменения в схему на рис. 4, *a*, а именно, дополним ее еще одним кольцом с ячейками 41 – 48, которые характеризуют емкость для сбора модифицированной смазки, то есть в них накапливается готовый продукт и поэтому концентрация может быть больше 1. Когда перейдем к реальной концентрации, то есть учтем объем готового продукта, то концентра-

ция будет равна заданной концентрации графеновых пластин в смазке. Таким образом, в нашем случае, область моделирования состоит из четырех кольцевых зон и восьми секторов.

При рассмотрении смешивания в радиальном направлении будем использовать цепи Маркова, аналогичные показанной на рис. 4, *д*, но с добавлением ячейки 41, которая характеризует емкость, где собирается модифицированная смазка. За один переход принимаем время  $\Delta t$ , за которое смесь переместится в ячейки одной кольцевой зоны и в ячейки следующей. Зная объем каждой ячейки  $V_1$  и производительность  $Q$ , численное значение  $\Delta t$ , в рассматриваемом варианте, можно определить по формуле

$$\Delta t = 8V_1 / Q. \quad (14)$$

Пусть начальное состояние системы имеет вид

$$S(0) = \{ 1; 0; 0; 0 \}. \quad (15)$$

Исходя из структуры марковской цепи (см. рис. 4, *д*), матрицу переходных вероятностей представим

$$P = \begin{bmatrix} P_{11,11} & P_{11,21} & P_{11,31} & P_{11,41} \\ P_{21,11} & P_{21,21} & P_{21,31} & P_{21,41} \\ P_{31,11} & P_{31,21} & P_{31,31} & P_{31,41} \\ P_{41,11} & P_{41,21} & P_{41,31} & P_{41,41} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Предположим, что элементы данной матрицы  $p_{11,21} = p_{21,31} = 2/3$ ;  $p_{11,31} = p_{21,41} = 1/3$ ;  $p_{31,41} = p_{41,41} = 1$ , а остальные элементы равны 0. Тогда, после завершения процесса смешивания в радиальном направлении, вектор состояния примет вид

$$S(1) = \{ 0; 0,67; 0,33; 0 \}. \quad (17)$$

Состояние системы существенно изменилось. В исходном состоянии ключевой компонент (графеновые пластины) находился только в ячейке 11, а после смешивания в радиальном направлении графеновые пластины присутствуют в ячейках 21 и 31, причем концентрация в ячейке 21 в два раза больше, чем в ячейке 31. Это объясняется тем, что в ячейку 21 перешли графеновые пластины с двух участков 1 и 3 (см. рис. 4, *б*), а в ячейку 31 – только с участка 2. В реальном процессе численные значения элементов матрицы могут быть совершенно другими, но в данном случае исследуется только качественная сторона процесса смешивания.

Следующий этап процесса – смешивание в окружном направлении. В этом случае цепь Маркова будет аналогична схеме (см. рис. 4, *е*). Следует отметить, что векторами исходных состояний являются вектора, составленные из элементов конечных состояний системы после реализации процесса смешивания в радиальном направлении для всех секторов, то есть на первом этапе необходимо реализовать процесс смешивания в радиальном направлении для восьми секторов, а на втором – для трех кольцевых зон. Отметим, что в наружной кольцевой зоне процесса смешивания не происходит.

Для второй кольцевой зоны вектор исходного состояния имеет вид

$$S(0) = \{ 0; 0,67; 0; 0; 0; 0; 0; 0 \}. \quad (18)$$

При окружном смешивании матрица переходных вероятностей имеет следующий вид:

$$P = \begin{bmatrix} P_{21,21} & P_{21,22} & P_{21,23} & P_{21,24} & P_{21,25} & P_{21,26} & P_{21,27} & P_{21,28} \\ P_{22,21} & \dots \\ P_{23,21} & \dots \\ P_{24,21} & \dots \\ P_{25,21} & \dots \\ P_{26,21} & \dots \\ P_{27,21} & \dots \\ P_{28,21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & P_{28,28} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Следует отметить, что в данном случае движение смеси происходит по замкнутому контуру. Например, из ячейки 22 графеновые пластины будут переходить в ячейки 23 – 28, а из ячейки 23 – в ячейки 24 – 28 и 21. Если вероятности перехода из конкретной ячейки в шесть последующих ячеек равны между собой и соответствуют 0,1667, то после реализации смешивания в окружном направлении вектор состояния для второй кольцевой зоны будет иметь вид

$$S(0) = \{ 0; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0 \}. \quad (20)$$

Сумма всех концентраций равна 0,67, то есть точно такая, как и в исходном векторе.

Аналогичным образом находим вектора состояний для третьей кольцевой зоны. После завершения процесса смешивания на первом переходе формируется вектор состояния для системы в целом. Данный вектор имеет размерность 24 (три кольцевых зоны и восемь секторов). Четвертая кольцевая зона не учитывается, поскольку в емкости для готового продукта смешивания не происходит. В нашем случае, вектор исходного состояния системы имеет следующий вид:

$$S(0) = \{ 1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 \}; \quad (21)$$

$$S(1) = \{ 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0,11169; 0; 0; 0,055; 0,055; 0,055; 0,055; 0,055; 0,055; 0 \}. \quad (22)$$

Сравнивая векторы исходного состояния (21) и состояния после первого перехода (22), видно значительное изменение в распределении графеновых пластин по объему смазки. Отметим, что сумма концентраций равна 1. Действительно, на первом переходе в систему введены графеновые пластины в количестве 1. Поскольку на следующем переходе материал из ячеек третьей кольцевой зоны перейдет в четвертую, то есть в емкость готового продукта, однородность смеси можно оценивать по отклонениям концентраций графеновых пластин в ячейках третьей кольцевой зоны от заданных значений.

Для количественной оценки интенсивности смешивания разделили область моделирования лабораторного дискового смесителя (наружный диаметр диска 60 мм) на десять кольцевых зон и 12 секторов. Система характеризовалась вектором с размерностью 120, а при расчете коэффициента неоднородности (равномерности распределения графеновых пластин по объему смеси) учитывали ячейки из девяти кольцевых секторов, то есть 108 ячеек. Проведены две серии численных экспериментов.

В первой серии имитировали подачу графенового концентрата только в первую ячейку первой кольцевой зоны. На каждом переходе концентрация графеновых пластин в исходной смеси, которую подавали в первую ячейку, была равна 10 %. В остальные ячейки первой кольцевой зоны подавали чистую смазку, то есть концентрация графеновых пластин равна нулю.

Во второй серии имитировали неравномерность распределения графеновых пластин в исходной смеси во времени. Смазку, содержащую графеновые пластины, на каждом переходе загружали во все ячейки первой кольцевой зоны, но с разными концентрациями графеновых пластин.

Процессы смешивания в каждой серии продолжали до тех пор, пока переставал изменяться коэффициент неоднородности в ячейках девятой кольцевой зоны.

Анализ результатов численных экспериментов показал, что коэффициенты неоднородности в первой серии, при прочих равных условиях, меньше тех, которые получали во второй. Учитывая данный результат, целесообразно исследовать вариант одновременной подачи пластической смазки и графенового концентрата в гомогенизатор-диспергатор двумя насосами с соответствующими производительностями.

### Выводы

Исследовано движение вязкой жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками. Получены математические зависимости для определения основных параметров движения вязкой жидкости в зазорах между плоскими и ступенчатыми дисками. На основе математического аппарата случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени, разработана модель процесса смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами. Декомпозиция процесса смешивания на радиальную и окружную составляющие позволила оценить интенсивность каждой из указанных составляющих. Используя результаты численных экспериментов, намечены пути совершенствования организации загрузки смазки и модификатора в гомогенизатор в целях повышения равномерности распределения графеновых пластин по всему объему смазки и стабилизации трибологических характеристик.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90159.*

#### *Список литературы*

1. Extraordinary Macroscale Wear Resistance of One Atom Thick Graphene Layer / D. Berman, S. A. Deshmukh, S. K. R. S. Sankaranarayanan [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2014. – Vol. 24, No. 42 (2014). – P. 6640 – 6646. doi: 10.1002/adfm.201401755
2. Experimental Research on Tribological Properties of Liquid Phase Exfoliated Graphene as an Additive in 30 SAE 10W Lubricating Oil / Xinbo Wang, Yafei Zhang, Zhongwei Yin [et al.] // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 135. – P. 29 – 37.
3. Phosphonium-Organophosphate Modified Graphene Gel Towards Lubrication Applications / Chaoliang Gan, Ting Liang, Duoli Chen [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 145. – P. 106180. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106180
4. Berman, D. Reduced Wear and Friction Enabled by Graphene Layers on Sliding Steel Surfaces in Dry Nitrogen / D. Berman, A. Erdemir, A. V. Sumant // *Carbon*. – 2013. – Vol. 59. – P. 167 – 175. doi: 10.1016/j.carbon.2013.03.006
5. Advances in Carbon Nanomaterials as Lubricants Modifiers / I. Ali, Al Arsh Basheer, A. Kucherova [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Vol. 279. – P. 251 – 266. doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.113
6. Development of Environmentally Safe Lubricants Modified by Graphene / V. F. Pershin, K. A. Ovchinnikov, Z. A. Alhilo [et al.] // *Nanotechnologies in Russia*. – 2018. – Vol. 13, No. 5-6. – P. 344 – 348. doi: 10.1134/S1995078018030138

7. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene / A. Tkachev, G. Zhumagalieva, Z. Al-Hilo [et al.] // Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology (RAN'19). – Rome, 2019. – P. ICNNFC 105-1–105-2. doi: 10.11159/icnnfc19.105

8. Alhilo, Z. A. A. Environmentally Friendly Technology for the Modification of Lubricants with Graphene Nanostructures / Z. A. A. Alhilo, G. Zhumagalieva, T. Pasko // MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 315. – P. 06005. doi: 10.1051/mateconf/202031506005

9. Simulation of Graphene-Containing Viscous Fluid Motion in the Gap Between Static and Rotating Discs / V Pershin, A Baranov, N. Memetov [et al.] // Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference on Virtual Simulation, Prototyping and Industrial Design 2018, 14 – 16 ноября 2018 г., Тамбов. – Тамбов, 2019. – Vol. 1278. – P. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012025

10. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие. В 10 томах. Т. VI Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд. – М. : Наука, 1986. – 736 с.

11. Баранцева, Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова. – Иваново : Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2008. – 116 с.

12. An Investigation of the Process of Mixing of Bulk Materials in a Drum-Blade Mixer / S. N. Cherpitskii, M. Y. Tarshis, L. V. Korolev, A. B. Kapranova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 56, No. 1-2. – P. 3 – 10. doi: 10.1007/s10556-020-00731-w

---

## Simulation of the Mixing Process in a Disc Homogenizer Disperser

Z. A. Alkhilo, A. A. Baranov, V. Mansur,  
E. N. Tugolukov, A. A. Pasko, V. F. Pershin

*Department of Equipment and Technology for the Development of Nanoproducts,  
pershin.home@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** graphite; few-layer graphene; multilayer graphene; grease; mixing; Markov chains.

**Abstract:** The movement of viscous fluid in a small gap between stationary and rotating disks is investigated and a mathematical description is given for flat and stepped disks. Using the mathematical apparatus of random Markov processes discrete in space and time, a model of the process of mixing grease with graphene plates in a rotary homogenizer disperser has been created. Decomposition of the process and consideration of separate mixing processes in the radial and circumferential directions made it possible to assess the intensity of these processes and develop recommendations for the transition from laboratory installations to industrial devices.

### References

1. Berman D., Deshmukh S.A., Sankaranarayanan S.K.R.S., Erdemir A., Sumant A.V. Extraordinary Macroscale Wear Resistance of One Atom Thick Graphene Layer, *Advanced Functional Materials*, 2014, vol. 24, no. 42 (2014), pp. 6640-6646, doi: 10.1002/adfm.201401755

2. Wang Xinbo, Zhang Yafei, Yin Zhongwei, Su Yanjie, Zhang Yanping, Cao Jun Experimental Research on Tribological Properties of Liquid Phase Exfoliated Graphene as an Additive in 30 SAE 10W Lubricating Oil, *Tribology International*, 2019, vol. 135, pp. 29-37.

3. Gan Chaoliang, Liang Ting, Chen Duoli, Li Wen, Fan Xiaoqiang, Tang Guanxiong, Lin Bo, Zhu Minhao Phosphonium-Organophosphate Modified Graphene Gel Towards Lubrication Applications, *Tribology International*, 2020, vol. 145, p. 106180, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106180

4. Berman D., Erdemir A., Sumant A.V. Reduced Wear and Friction Enabled by Graphene Layers on Sliding Steel Surfaces in Dry Nitrogen, *Carbon*, 2013, vol. 59, pp. 167-175, doi: 10.1016/j.carbon.2013.03.006

5. Ali I., Basheer Al Arsh, Kucherova A., Memetov N., Pasko T., Ovchinnikov K., Pershin V., Kuznetsov D., Galunin E., Grachev V., Tkachev A. Advances in Carbon Nanomaterials as Lubricants Modifiers, *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 279, pp. 251-266, doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.113

6. Pershin V.F., Ovchinnikov K.A., Alhilo Z.A.A., Stolyarov R.A., Memetov N.R. Development of Environmentally Safe Lubricants Modified by Graphene, *Nanotechnologies in Russia*, 2018, vol. 13, no. 5-6, pp. 344-348, doi: 10.1134/S1995078018030138

7. Tkachev A., Zhumagalieva G., Al-Hilo Z., Memetov N., Galunin E., Pershin V. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene, Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology (RAN'19), Rome, 2019, pp. ICNNFC 105-1–105-2, doi: 10.11159/icnnfc19.105

8. Alhilo Z.A.A., Zhumagalieva G., Pasko T. Environmentally Friendly Technology for the Modification of Lubricants with Graphene Nanostructures, *MATEC Web of Conferences*, 2020, vol. 315, p. 06005, doi: 10.1051/mateconf/202031506005

9. Pershin V., Baranov A., Memetov N., Tugolukov E., Alhilo Z. Simulation of Graphene-Containing Viscous Fluid Motion in the Gap Between Static and Rotating Discs, Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference on Virtual Simulation, Prototyping and Industrial Design 2018, 14 - 16 November, 2018, Tambov, 2019, vol. 1278, p. 012025, doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012025

10. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika: uchebnoye posobiye. V 10 tomakh. T. VI Gidrodinamika* [Theoretical physics: textbook. In 10 volumes. Vol. VI Hydrodynamics], Moscow: Nauka, 1986, 736 p. (In Russ.)

11. Barantseva Ye.A., Mizonov V.Ye., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovaniye, optimizatsiya, raschet* [Processes of mixing loose materials: modeling, optimization, calculation], Ivanovo: Ivanovskiy gos. energeticheskiy un-t im. V. I. Lenina, 2008, 116 p. (In Russ.)

12. Cherpitskii S.N., Tarshis M.Y., Korolev L.V., Kapranova A.B. An Investigation of the Process of Mixing of Bulk Materials in a Drum-Blade Mixer, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 56, no. 1-2, pp. 3-10, doi: 10.1007/s10556-020-00731-w

---

### **Mischprozesssimulation in einem Scheibenhomogenisierungsapparat-Dispergierer**

**Zusammenfassung:** Es ist die Bewegung einer viskosen Flüssigkeit in einem kleinen Spalt zwischen einer stationären und einer rotierenden Scheibe untersucht und die mathematische Beschreibung für flache und gestufte Scheiben ist gegeben. Auf der Grundlage der mathematischen Apparatur zufälliger Markov-Prozesse, die räumlich und zeitlich diskret sind, ist ein Modell des Prozesses zum Mischen eines Fettes mit Graphenplatten in einem rotierenden Homogenisator-Dispergierer erstellt. Die Zerlegung des Prozesses und die Berücksichtigung getrennter Mischprozesse in radialer und Umfangsrichtung ermöglichten es, die Intensität dieser Prozesse zu bewerten und Empfehlungen für den Übergang von Laborinstallationen bis zu industriellen Geräten zu entwickeln.

## Modélisation du processus du mélange dans l'homogénéisateur-disperseur à disque

**Résumé:** Est étudié le mouvement du fluide visqueux dans le petit espace entre les disques fixes et rotatifs; est donnée une description mathématique pour les disques plats et étagés. A la base d'un appareil mathématique des processus aléatoires discrets dans l'espace et le temps de Markov, est établi un modèle du mélange de la graisse avec des plastiques de graphène dans un homogénéisateur-disperseur rotatif. La décomposition du procédé et l'examen séparé des processus de mélange dans les directions radiale et circonférentielle ont permis d'évaluer l'intensité de ces processus et d'élaborer des recommandations pour la transition des installations de laboratoire aux appareils industriels.

---

**Авторы:** *Алхило Заман Абуд* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Баранов Андрей Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Мансур Васем* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Пасько Александр Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», 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.

## УПЛОТНЕНИЕ РАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛА ПРОТЕЧКИ

В. Д. Продан<sup>1</sup>, Г. В. Божко<sup>1</sup>, М. С. Фокина<sup>2</sup>, Н. И. Воробьева<sup>1</sup>

*Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии»(1), hitema@npp-htm.ru,  
Центр проектной деятельности (2),  
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** герметичность; каналы протечки; крепежные элементы; прокладка; прокладочный коэффициент; разъемные соединения; терморасширенный графит; уплотняющие поверхности; фланцы.

**Аннотация:** Рассмотрены виды разъемных неподвижных соединений с упругим и пластичным уплотнением, указаны их недостатки. Представлена новая конструкция уплотнительного узла для неподвижных и подвижных соединений, исключая данные недостатки. Герметичность конструкции обеспечивается за счет повышения гидравлического сопротивления канала протечки уплотняемой среды, имеющего сечение в виде равностороннего треугольника. Канал спирально размещен в зоне контакта уплотняющих поверхностей, вход и выход которого расположены по внутреннему и наружному диаметрам сопрягаемых поверхностей соответственно. Представлены выражения, позволяющие рассчитать предлагаемый тип соединения для реальных условий его применения.

---

Применяемые на практике разъемные неподвижные соединения уплотняют или поверхностями сопрягаемых деталей (беспрокладочные соединения), или прокладкой, выполненной из материала, твердость которого меньше, чем твердость уплотняемых поверхностей фланцев (прокладочные соединения).

Для беспрокладочных герметичных соединений требуется повышенная точность и чистота обработки сопрягаемых уплотняющих поверхностей и значительная нагрузка при сборке соединения крепежными деталями. Для прокладочных соединений нет необходимости в тщательной обработке уплотняемых поверхностей соединения, так как материал прокладки в процессе сборки соединения заполняет возможные зазоры между сопрягаемыми поверхностями уплотняемого разъема. Однако при колебаниях температуры рабочей среды вследствие различия значений коэффициента термического расширения материала прокладки и замыкающих ее деталей соединения возможно нарушение его герметичности.

Рассматриваемая конструкция уплотнительного узла свободна от этих недостатков и может быть использована для уплотнения разъемных соединений и неподвижных, и подвижных. Конструкция разъемного герметичного соединения, на полезную модель которой получен патент РФ [1], обеспечивает герметичность за счет повышения гидравлического сопротивления канала протечки уплотняемой

среды. В данных соединениях канал протечки может быть одним, спирально размещенным в зоне контакта уплотняющих поверхностей соединения, или таких каналов может быть несколько. Площадь сечения каналов выполняется относительно небольшой в виде равностороннего треугольника.

На рисунке 1 представлена конструктивная схема такого соединения. Вход и выход уплотняемой среды в канал осуществляются соответственно со стороны внутреннего  $d$  и внешнего  $D$  диаметров разъемного соединения. Для данного соединения требуемая осевая сила предварительной затяжки крепежных элементов  $Q_3$ , Н, будет существенно меньше, чем для существующего фланцевого соединения, и равна осевой силе давления  $p$  рабочей среды на поверхность фланца  $l$  с учетом коэффициента жесткости соединения  $\alpha$  [2]

$$Q_3 = 0,25\alpha p l d_{cp}^2 = 0,0625\alpha p l (D + d)^2;$$

$$\alpha = \lambda_{п} / (\lambda_{п} + \lambda_{б}),$$

где  $\lambda_{п}$  и  $\lambda_{б}$  – осевые податливости соответственно системы «прокладки» и «болта», то есть элементов разъемного герметичного соединения, которые соответственно разгружаются и нагружаются при увеличении давления уплотняемой среды, м/Н [2].

Осевая податливость уплотняемой зоны рассматриваемого соединения  $\lambda_{п}$ , м/Н,

$$\lambda_{п} = 1,02h / (nL_{cp}hE) = 1,02 / (nL_{cp}E), \quad (1)$$

где  $n$  – число витков канала протечки;  $L_{cp}$  – усредненная длина одной спирали канала протечки, м;  $h$  – ширина верхней стороны стенки канавки, м;  $E$  – модуль упругости материала уплотнительного элемента, Н/м<sup>2</sup>.

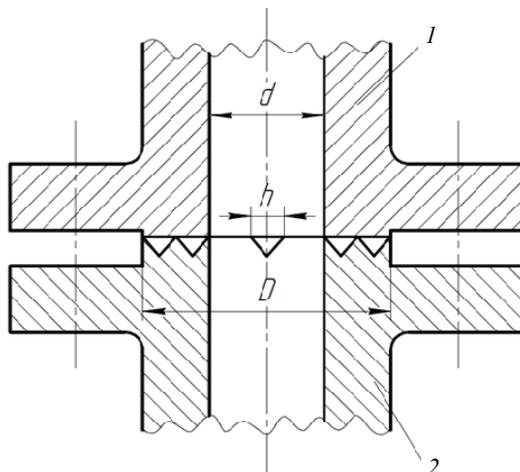
Выражение (1) взято как обратное значение коэффициента жесткости конического элемента [3, с. 355]. Значение осевой податливости фланцевого соединения  $\lambda_{б}$  можно определить из литературы [2, табл. 4.7 – 4.10].

Давление уплотняемой рабочей среды  $p$ , Н/м<sup>2</sup>,

$$p = \Delta p + p_{\text{вых}},$$

где  $\Delta p$  – потеря давления уплотняемой среды при движении ее в канале, Н/м<sup>2</sup>;

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2,$$



**Рис. 1. Конструктивная схема уплотнительного узла разъемных соединений:**  
1, 2 – фланцы с гладкой уплотняющей поверхностью и с выполненным на его уплотняющей поверхности спиральным каналом протечки соответственно

где  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$  – потери давления среды в результате трения о стенку канала и изменения направления движения и в результате местного сопротивления при входе среды в канал соответственно, Н/м<sup>2</sup>.

Давление среды на выходе из канала протечки снижается за счет увеличения гидравлического сопротивления до  $p_{\text{вых}}$ . При движении среды в прямолинейном канале величина гидравлического сопротивления [4]

$$\Delta p_1 = \lambda_T L w^2 \rho / (2d_3), \quad (2)$$

где  $\lambda_T$  – безразмерный коэффициент трения, зависящий от шероховатости стенки канала и режима течения среды в канале;  $L$  – длина одной спирали канала протечки, м;  $w$  – значение скорости движения уплотняемой среды в канале, м/с;  $\rho$  – плотность уплотняемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $d_3$  – эквивалентный диаметр для канала, отличного от круглого сечения, м. При ламинарном режиме течения ( $Re < 2300$ )  $\lambda_T$  не зависит от шероховатости стенки канала, а зависит от числа Рейнольдса. Так, для треугольного равностороннего сечения канала

$$\lambda_T = 53/Re;$$

$$Re = w d_3 \rho / \mu,$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, Па · с.

Значение скорости движения среды  $w$  для канала сечением в виде равностороннего треугольника можно определить из заданного значения ее протечки  $V$ , м<sup>3</sup>/с, в канале и площади  $f$  сечения канала, м<sup>2</sup>.

Для сечения канала в виде равностороннего треугольника со стороной  $h$ , м,

$$f = 0,433h^2,$$

тогда

$$w = V/f = V/(0,433h^2). \quad (3)$$

Эквивалентный диаметр для канала, отличного от круглого сечения определяется по выражению:

$$d_3 = 4f/P,$$

где  $P$  – периметр, м, и равен

$$d_3 = 4 \cdot 0,433h^2 / (3h) = 0,577h.$$

Полное сопротивление канала

$$\Delta p = 0,25w^2 \rho + \lambda_T L w^2 \rho / (2d_3). \quad (4)$$

При криволинейном движении среды в канале сопротивление ее движению будет больше, чем при прямолинейном, в  $\Phi$  раз [4]

$$\Phi = 1 + d_3/D_{\text{ср}},$$

где  $D_{\text{ср}}$  – средний радиус уплотняющей поверхности соединения, м.

Учитывая, что радиус кривизны канала протечки переменный и зависит от значения текущего радиуса уплотнительного кольца, расчеты следует вести по  $D_{\text{ср}}$ .

Длина одной спирали канала

$$L_1 = 0,5 \pi (D + d). \quad (5)$$

Число ветвей одиночного канала на уплотняющей поверхности соединения есть отношение ширины контакта поверхностей к стороне треугольника

$$n = 0,5(D - d)/h. \quad (6)$$

Общая длина одиночного канала протечки с учетом выражений (5) и (6) определяется по выражению

$$L = nL_1 = 0,25\pi (D^2 - d^2)/h. \quad (7)$$

Используя выражение (7), получим ширину уплотняющей поверхности соединения, занятую спиральной канавкой:

$$0,5(D - d) = hn.$$

Для определения давления среды на выходе из канала протечки воспользуемся законом Пуазейля [5].

Объемный расход протечки уплотняемой среды на выходе из одиночного канала  $V$ , м<sup>3</sup>/с, определяется по выражению

$$V = \pi p_{\text{вых}} (d_3/2)^4 / (8 \mu L). \quad (8)$$

Если уплотнительный узел имеет  $i$  каналов протечки, то расчетное значение объемной протечки через каждый канал уплотнения

$$V_1 = V/i.$$

Из выражения (8) определим  $p_{\text{вых}}$ , Па,

$$p_{\text{вых}} = 8V\mu L / (\pi(d_3/2)^4) = 128V\mu L / (\pi d_3^4).$$

Представленные расчетные выражения дают возможность рассчитать предлагаемый тип соединения для реальных условий его применения.

Рассмотренное уплотнение может быть использовано для герметизации рабочих сред с повышенной вязкостью (для жидкости) при относительно небольшом ее давлении; разъемных соединений, на уплотняющих поверхностях которых возможно разместить заданную длину канала протечки, например, для барабанных аппаратов. Данный тип уплотнения можно применить в подвижных соединениях с торцевым уплотнением. Канавка спирально выполняется на уплотняющей поверхности аксиально-подвижного кольца по направлению его вращения. В таком исполнении создаваемое вращающимися стенками спиральных канавок давление уплотняемой среды создаст дополнительное гидравлическое сопротивление протекающей по каналу среде, что может полностью исключить ее протечку при работе торцевого уплотнения [6]. В данном случае целесообразно использовать уплотнение с несколькими канавками протечки. Отличие такого соединения от рассмотренного выше неподвижного герметичного соединения заключается в том, что вход в каналы сопротивления осуществляется со стороны наружного диаметра  $D$  вращающегося аксиально-подвижного кольца, а выход – со стороны внутреннего диаметра  $d$ .

#### *Список литературы*

1. Пат. на полезную модель 197904 Российская Федерация, МПК F16L 23/028, F16J 15/04, F16J 15/48. Герметичное разъемное соединение / В. Д. Продан, Г. В. Божко, А. С. Михальченко, И. В. Скопинцев, М. С. Фокина. – № 2019141605 ; заявл. 16.12.2019 ; опубл. 04.06.2020, Бюл. № 16. – 5 с.
2. Продан, В. Д. Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды : учеб. пособие / В. Д. Продан. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 280 с.
3. Справочник машиностроителя в 6 томах. Т. 3 / Под ред. С. В. Серенсена. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Машгиз, 1962. – 651 с.

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1981. – 560 с.

5. Политехнический словарь / Гл. ред. И. И. Артоболевский. – М. : Изд-во «Советская энциклопедия», 1977. – 608 с.

6. Продан, В. Д. Герметичность оборудования : учеб. пособие / В. Д. Продан, Г. В. Божко. – М. : Университет машиностроения, 2014. – 109 с.

---

## Detachable Joint Sealing Based on Leakage Duct Hydraulic Resistance

V. D. Prodan<sup>1</sup>, G. V. Bozhko<sup>1</sup>, M. S. Fokina<sup>2</sup>, N. I. Vorobyova<sup>1</sup>

*Department of Processes and Devices of Chemical Technology (1),  
hitema@npp-htm.ru; Project Work Center (2),  
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

**Keywords:** tightness; leakage channels; fasteners; gasket; spacer factor; detachable connections; thermally expanded graphite; sealing surfaces; flanges.

**Abstract:** The types of detachable fixed joints with elastic and plastic sealing are considered, their disadvantages are indicated. A new design of the sealing unit for fixed and movable joints is presented, eliminating these disadvantages. The tightness of the structure is ensured by increasing the hydraulic resistance of the leakage channel of the sealed medium, which has a cross-section in the form of an equilateral triangle. The channel is spirally placed in the contact zone of the sealing surfaces, the inlet and outlet of which are located along the inner and outer diameters of the mating surfaces, respectively. Expressions for calculation of the proposed type of joints for real conditions of its use are presented.

### References

1. Prodan V.D., Bozhko G.V., Mikhal'chenko A.S., Skopintsev I.V., Fokina M.S. *Germetichnoye raz'yemnoye soyedineniye* [Sealed detachable connection], Russian Federation, 2020, Patent for utility model 197904. (In Russ.)

2. Prodan V.D. *Germetichnost' raz'yemnykh soyedineniy oborudovaniya, ekspluati-ruyemogo pod davleniyem rabochey sredy: uchebnoye posobiye* [Tightness of detachable joints of equipment operated under pressure of the working environment: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO "TGTU", 2012, 280 p. (In Russ.)

3. Serensen S.V. [Ed.] *Spravochnik mashinostroitel'ya v 6 tomakh. T. 3* [Handbook of a mechanical engineer in 6 volumes. Vol. 3], Moscow: Mashgiz, 1962, 651 p. (In Russ.)

4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: uchebnoye posobiye* [Examples and tasks for the course of processes and apparatuses of chemical technology: a tutorial], Leningrad: Khimiya, 1981, 560 p. (In Russ.)

5. Artobolevskiy I.I. [Ed.] *Politekhnicheskiy slovar'* [Polytechnic Dictionary], Moscow: Izdatel'stvo "Sovetskaya entsiklopediya", 1977, 608 p. (In Russ.)

6. Prodan V.D., Bozhko G.V. *Germetichnost' oborudovaniya: uchebnoye posobiye* [Leakage of equipment: a tutorial], Moscow: Universitet mashinostroyeniya, 2014, 109 p. (In Russ.)

## Abdichtung der Steckverbindung auf der Grundlage des hydraulischen Widerstands des Kanals des Dichtungsverlustes

**Zusammenfassung:** Es sind die Arten von abnehmbaren festen Verbindungen mit elastischer und plastischer Abdichtung betrachtet, ihre Nachteile sind angegeben. Um diese Nachteile zu beseitigen, ist eine neue Konstruktion der Dichtungseinheit für feste und bewegliche Verbindungen vorgestellt. Die Dichtheit der Struktur wird durch Erhöhen des hydraulischen Widerstands des Kanals des Dichtungsverlustes des eingedichteten Mediums sichergestellt, das einen Querschnitt in Form eines gleichseitigen Dreiecks aufweist. Der Kanal ist spiralförmig in der Kontaktzone der Dichtflächen angeordnet, deren Einlass und Auslass sich entlang des Innen- bzw. Außendurchmessers der Passflächen befinden. Es sind Ausdrücke dargestellt, mit denen der vorgeschlagene Verbindungstyp für die tatsächlichen Verwendungsbedingungen berechnet werden kann.

---

## Consolidation du joint d'étanchéité à la base de la résistance hydraulique du canal de fuite

**Résumé:** Sont examinés les types des connexions fixes séparables avec un joint élastique et plastique; sont indiqués leurs inconvénients. Est présentée une nouvelle conception de l'ensemble d'étanchéité pour les joints fixes et mobiles éliminant ces inconvénients. L'étanchéité de la structure est assurée par une augmentation de la résistance hydraulique du canal de fuite du milieu d'étanchéité ayant une section transversale sous la forme d'un triangle équilatéral. Le canal est placé en spirale dans la zone de contact des surfaces d'étanchéité dont l'entrée et la sortie sont respectivement situées le long des diamètres intérieur et extérieur des surfaces d'accouplement. Sont présentées des indications permettant de calculer le type du composé proposé pour les conditions réelles de son application.

---

**Авторы:** **Продан Василий Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор; **Божко Григорий Вячеславович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; **Фокина Мария Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент Центра проектной деятельности; **Воробьева Наталья Ивановна** – старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.

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

## ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КРЕМНЕЗЕМА КРАСНОСЛОБОДСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. М. Мордасов, М. Д. Мордасов

*Кафедра «Материалы и технология», mit@tstu.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** дифрактограмма; дифракционный пик; кремнезем; рентгенофазовый анализ; трепел; химический состав.

**Аннотация:** Осуществлено исследование химического и фазового составов трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области с использованием современного оборудования. На основе рентгенофлуоресцентного анализа установлен основной элементный состав изучаемой породы, определяемый, главным образом, соединениями Si, Al, Fe, K, Mg, Ca, Ti, P, S, Na. Показано, что доля диоксида кремния в исследуемом образце превосходит его содержание в трепелах многих Российских месторождений и стран ближнего зарубежья. Рентгенофазовый анализ с последующей расшифровкой дифрактограммы показал, что в состав трепела входят минералы аморфного опала, микрокристаллические  $\alpha$ - и  $\beta$ -кристаллиты, как структурные формы кремнезема, а также в малых количествах примеси кварца, иллита и монтмориллонита.

---

Кремнезем является одним из самых распространенных в природе веществ. В земной коре содержится 58,3 % кремнезема, который встречается в формах кристаллического кварца, скрытокристаллического (халцедона, агата, яшмы, кремня), аморфного и др.

Аморфный кремнезем представлен горными породами вулканического происхождения (пемзой, перлитами, обсидианами) и породами осадочного происхождения (диатомитом, опокой, трепелом).

Трепел – легкая кремнистая тонкопористая порода, состоящая в основном из мельчайших бесструктурных частиц опала и кристобалита. Светло-серая окраска в значительной степени связана с присутствием органического материала и гидроксидов железа. Объемный вес трепела составляет 0,7...0,9 г/см<sup>3</sup>.

В отличие от диатомита в трепелах содержится меньше органических остатков. Кроме аморфного кремнезема, в них присутствуют кремнезем в силикатной форме, кварц, а также глинистые минералы. Характерной особенностью данной породы является, с одной стороны, наличие активной аморфной кремнекислоты, с другой – тонкодисперсная структура. Совокупность указанных свойств обуславливает высокую гидравлическую активность трепела и возможность его использования в качестве структурирующих и функциональных добавок и наполнителей.

Развитие промышленности строительных материалов и индустриального домостроения тесно связано с обеспечением строительного рынка в достаточных объемах высококачественными, конкурентоспособными строительными материалами, изделиями и конструкциями местного производства. Следует отметить, что наличие и рациональное использование местных сырьевых ресурсов является определяющим фактором регионального развития производства конкурентоспособных строительных материалов, изделий и конструкций на основе современных наукоемких технологий.

В зависимости от места залегания трепелы имеют различные химический и фазовый составы. В ряде отечественных работ [1 – 3] приводятся исследования трепелов соответствующих конкретных регионов. Разработка технологий их использования требует дифференцированного подхода, основанного на всесторонних исследованиях состава, структуры и свойств [4 – 6]. На территории Тамбовской области в результате геологоразведочных работ выявлено десять участков залегания трепелов, наибольшее число которых локализовано в рамках Краснослободского месторождения.

Цель работы – изучить химический и фазовый составы трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области.

В таблице 1 представлены результаты рентгенофлуоресцентного анализа трепела. Анализ выполнен в Институте геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук на спектрометре VRA-30 (Германия) при следующих параметрах: напряжение на аноде 30 кВ, ток 40 мА, материал анода – вольфрам. Измерения проводились в вакууме. При проведении исследований анализируемые пробы истирали целиком, затем по 5 г из них истирали со связующим (ПВС-8) и прессовали при давлении 25...27 т/см<sup>2</sup> на подложке из борной кислоты.

Анализ содержания компонентов и отклонений их величин (см. табл. 1) показывает, что начиная с Ag относительная погрешность определения содержания элемента, определяемая по формуле  $\delta_s = \frac{s}{C_s} \cdot 100 \%$ , увеличивается с 7,3 до 27,3 %

у Nb. Можно считать, что данные элементы содержатся в следовых концентрациях и не влияют на технологические и функциональные свойства кремнезема. Относительная погрешность определения содержания элементов Si, Al, Fe, K, Mg, Ca, Ti, P, S, Na не превышает 5 %. Эти элементы входят в состав породообразующих минералов, определяющих поведение трепела в различных технологических процессах его переработки, обработки и модификации.

Результаты исследований показывают, что доля диоксида кремния (79,01 %), превосходит его содержание в трепелах многих Российских месторождений и стран ближнего зарубежья.

В таблице 1 представлен весьма приблизительный компонентный состав трепела. В действительности его состав более сложный и может включать как простые оксиды в различных полиморфных модификациях, так и сложные соединения.

Природу и количество кристаллических фаз позволяет установить метод рентгенофазового анализа, который основан на том, что каждое кристаллическое соединение дает рентгенограмму со специфическим набором линий (дифракционных пиков) определенной интенсивности. Рентгенограмма представляет собой графическую зависимость распределения интенсивности отраженных от образца рентгеновских лучей при изменении угла отражения. Если вещество кристаллическое, то на рентгенограмме наблюдается ряд четких максимумов, аморфное – пики размытые.

**Результаты рентгенофлуоресцентного анализа трепела  
Краснослободского месторождения Тамбовской области**

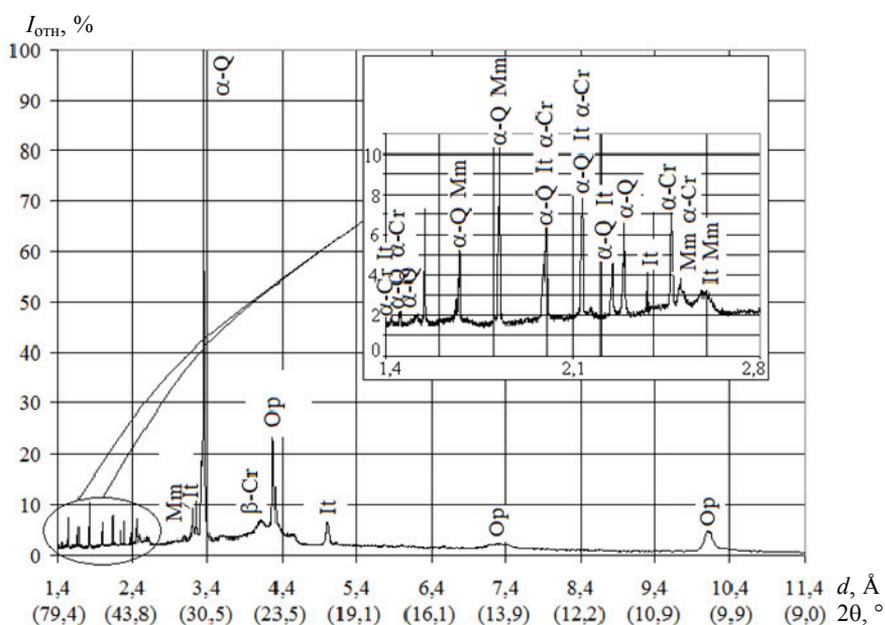
Компонент	$C_k$	$s$	Элемент	$C_s$	$s$
SiO <sub>2</sub>	79,01000	0,20000	Si	36,94000	0,10000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,79000	0,16000	Al	5,71000	0,08000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,83000	0,10000	Fe	2,68000	0,07000
K <sub>2</sub> O	2,09000	0,07000	K	1,73000	0,06000
MgO	1,38000	0,06000	Mg	0,83000	0,03500
CaO	0,92500	0,04600	Ca	0,66100	0,03300
TiO <sub>2</sub>	0,50400	0,02500	Ti	0,30200	0,01500
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,50100	0,02500	P	0,21900	0,01100
SO <sub>3</sub>	0,37300	0,01900	S	0,15000	0,00700
Na <sub>2</sub> O	0,12100	0,00600	Na	0,09000	0,00450
Ag <sub>2</sub> O	0,01920	0,00140	Ag	0,01790	0,00130
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01460	0,00120	V	0,00820	0,00070
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01320	0,00100	Cr	0,00900	0,00070
MoO <sub>3</sub>	0,01130	0,00060	Mo	0,00750	0,00040
TeO <sub>2</sub>	0,00560	0,00220	Te	0,00450	0,00180
PbO	0,00560	0,00060	Pb	0,00520	0,00060
MnO	0,00460	0,00070	Mn	0,00360	0,00050
ZnO	0,00400	0,00060	Zn	0,00320	0,00050
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00280	0,00060	Bi	0,00250	0,00050
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,00140	0,00070	Co	0,00100	0,00050
Rb <sub>2</sub> O	0,00120	0,00030	Rb	0,00110	0,00030
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00110	0,00030	Y	0,00087	0,00023
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00110	0,00030	Nb	0,00077	0,00021

Сущность рентгенофазового анализа сводится к сопоставлению экспериментально определенных значений межплоскостных расстояний  $d$  и относительных интенсивностей  $I_{отн}$  рефлексов с эталонными рентгенограммами. Если на полученной при исследовании образца рентгенограмме присутствуют дифракционные максимумы со значениями  $d$  и  $I$ , характерными для определенного соединения, то это значит, что оно присутствует в исследуемом материале.

В настоящей работе при расшифровке рентгенограмм использовалась база данных RRUFF, а также таблицы межплоскостных расстояний, приведенные в справочной литературе [7, 8].

На рисунке 1 представлена рентгенограмма трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области. Рентгенограмма получена в Центре высоких технологий ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific. Сканирование осуществлялось в диапазоне углов  $2\theta$  от 8 до 80° с шагом 0,02°, длина волны рентгеновского излучения  $\lambda = 1,788996 \text{ \AA}$ .

Трепел относится к опал-кристаллитовым породам. В результате длительного протекания процессов рекристаллизации осадков (продуктов выветривания пород, остатков вымерших организмов и т.п.), формирования минералов, процессов



**Рис. 1. Рентгенограмма трепела  
Краснолободского месторождения Тамбовской области:**  
 $\alpha$ -Q –  $\alpha$ -кварц;  $\alpha$ -Cr –  $\alpha$ -кристобалит;  $\beta$ -Cr –  $\beta$ -кристобалит;  
 Op – опал; It – иллит; Mm – монтмориллонит

гидратации и дегидратации, в трепелах происходит растворение кремнистых панцирей организмов и нарушение биоморфной структуры. Такая структурная трансформация сопровождается изменением минерального и фазового составов. За счет реакций растворения, осаждения, перекристаллизации и полиморфных изменений кремнезема опал-А (аморфный) трансформируется в опал-СТ (микрорекристаллический), а впоследствии в опал-С, характеризующийся большей степенью упорядоченности кремнезема.

В подавляющем большинстве трепелов сочетаются сферы опала из аморфного кремнезема и сферы, состоящие из нанокристаллических пластинок  $\alpha$ -кристобалита с большой разупорядоченностью упаковки. Глобулы опал-кристобалитовой структуры контактируют как друг с другом, так и с примесными частицами других минералов (глинозема, кварца).

Наличие на дифрактограмме диагностических пиков опала (4,284; 7,298; 10,082 Å) указывает, что преобладающей модификацией кремнезема в трепеле Краснолободского месторождения Тамбовской области является опал с начальными признаками формирования фазы  $\beta$ -кристобалита, о чем свидетельствует размытый пик (4,133 Å), характерный для неупорядоченного кристобалита (см. рис. 1). Присутствие высокотемпературной модификации кристобалита  $\beta$  в условиях, несоответствующих термодинамическим пределам его образования, объясняется метастабильностью данной фазы.

Низкая степень упорядоченности опал-кристобалитовых слоев подтверждается аморфным гало в диапазоне углов рассеяния 22...27°.

В работах ряда исследователей [9, 10] о степени кристалличности опал-кристобалитовых структур судят по наличию и высоте пика при  $2\theta = 36^\circ$ . Данный пик называют «пиком кристалличности». Его отсутствие на дифрактограмме рис. 1 говорит о высокой степени структурной разупорядоченности опала.

Нанокристаллическая фаза  $\alpha$ -кristобалита диагностируется по пикам в области малых межплоскостных расстояний: 2,466; 2,134; 1,996; 1,662; 1,455; 1,420 Å. В результате расчета размера области когерентного рассеяния (ОКР) по формуле Дебая–Шеррера для характерного пика  $\alpha$ -кristобалита 2,466 Å получено значение 54 нм. Поскольку размер ОКР можно рассматривать как средний размер кристаллитов, расчеты подтвердили низкие размеры частиц  $\alpha$ -кristобалита, находящегося на начальной стадии формирования.

Присутствующий в породе  $\alpha$ -кварц диагностируется, главным образом, по пику 3,360 Å, имеющему на дифрактограмме максимальную интенсивность. Отсутствие некоторых диагностических пиков  $\alpha$ -кварца, а также снижение интенсивности присутствующих пиков в два раза, по сравнению со справочными значениями, говорит о незначительном количестве данной фазы.

В исследуемом образце трепела по пикам 5,017; 4,510; 3,260; 2,579; 2,380; 2,244; 2,134; 1,996; 1,420 Å диагностируется иллит, представляющий собой продукт взаимодействия мусковита ( $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ) с водой. По малой интенсивности данных пиков можно сделать вывод о незначительном содержании этой фазы.

Другим глинистым минералом, входящим в состав трепела, является монтмориллонит ( $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ). Данный минерал имеет непостоянный химический состав, который зависит от содержания воды. Монтмориллонит диагностируется по слабым рефлексам 3,212; 2,579; 2,499; 1,822; 1,675 Å, некоторые из которых совпадают с более сильными рефлексам  $\alpha$ -кварца,  $\alpha$ -кristобалита и иллита. Низкая интенсивность рефлексов свидетельствует о малом содержании монтмориллонита в породе.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что в состав изучаемой породы входят минералы кварца,  $\alpha$ - и  $\beta$ -кristобалитов, опала, иллита и монтмориллонита.

Полученные в работе результаты позволят в дальнейшем, при разработке технологий переработки и модификации трепела, обоснованно осуществить выбор технологических параметров, с учетом специфики поведения породообразующих минералов при термическом, механическом или химическом воздействии на них.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 19–43–680003.*

#### *Список литературы*

1. Ходырев, В. М. Перспективы использования трепелов в производстве строительных материалов / В. М. Ходырев // Сухие строительные смеси. – 2013. – № 2. – С. 24–25.
2. Пат. 2561437 Российская Федерация, МПК С04В 28/26, С04В 38/10, С04В 111/40. Безобжиговый теплоизоляционный материал на основе трепела Сухоложского месторождения Свердловской области / С. С. Радаев, О. И. Селезнева, М. В. Кудоманов, Г. А. Горгодзе, Н. З. Рясная, К. С. Иванов, К. Н. Илюхин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2014127250/03 ; заявл. 03.07.2014 ; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 5 с.
3. Zahalkova, J. Study of the Effect of Diatomite as a Partial Replacement of Cement in Cement Pastes / J. Zahalkova, P. Rovnanikova // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 865. – P. 22 – 26.

4. Мордасов, М. Д. Особенности структурных изменений трепела при его термической обработке / М. Д. Мордасов, А. В. Никитин, Д. Л. Полушкин // Сб. материалов XVII Всероссийской с междунар. участием школы-семинара по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А. Г. Мерджанова. – Черноголовка, 2019. – С. 139 – 141. doi: 10.24411/9999-004A-2019-10047

5. Мордасова, Н. А. Изучение микроструктуры трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области / Н. А. Мордасова, Д. О. Завражин, Д. М. Мордасов // Сб. материалов XVII Всероссийской с междунар. участием школы-семинара по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А. Г. Мерджанова. – Черноголовка, 2019. – С. 142 – 144. doi: 10.24411/9999-004A-2019-10048

6. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д. М. Мордасов, П. В. Макеев, Д. Л. Полушкин, М. Д. Мордасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 136 – 141. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.136-141

7. Китайгородский, А. И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел / А. И. Китайгородский. – М. ; Л. : Гос. изд-во технико-теорет. литературы, 1952. – 588 с.

8. Михеев, В. И. Рентгенометрический определитель минералов / В. И. Михеев. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1957. – 868 с.

9. Jones, J. B. Structure of Opal / J. B. Jones, J. V. Sanders, E. R. Segnit // Nature. – 1964. – Vol. 204, No. 12. – P. 990–991.

10. Дышин, А. А. Получение  $\alpha$ -кристобалита сушкой синтетических опаловых матриц, синтезированных золь-гель методом, в сверхкритическом диоксиде углерода / А. А. Дышин, Г. В. Бондаренко, М. Г. Киселев // Сверхкритические флюиды: теория и практика. – 2018. – Т. 13, № 4. – С. 94 – 104.

---

## Phase Composition of Silicon in the Krasnoslobodsky Deposit of the Tambov Region

D. M. Mordasov, M. D. Mordasov

*Department of Materials and Technology, mit@tstu.ru;  
TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** diffractogram; diffraction peak; silica; X-ray phase analysis; trembled; chemical composition.

**Abstract:** The study of the chemical and phase compositions of tripoli from Krasnoslobodskoye deposit in the Tambov region was carried out using modern equipment. Using the X-ray fluorescence analysis, the main elemental composition of the rock under study was established, determined mainly by the compounds of Si, Al, Fe, K, Mg, Ca, Ti, P, S, Na. It is shown that the proportion of silicon dioxide in the sample under study exceeds its content in tripoli from many Russian deposits and neighboring countries. The X-ray phase analysis with subsequent interpretation of the diffraction pattern showed that tripoli contains minerals of amorphous opal, microcrystalline  $\alpha$ - and  $\beta$ -cristobalites as structural forms of silica, as well as small amounts of quartz, illite and montmorillonite impurities.

## References

1. Khodyrev V.M. [Prospects for the use of tripoli in the production of building materials], *Sukhiye stroitel'nyye smesi* [Dry building mixtures], 2013, no. 2, pp. 24-25. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Radayev S.S., Selezneva O.I., Kudomanov M.V., Gorgodze G.A., Rysnaya N.Z., Ivanov K.S., Ilyukhin K.N. *Bezobzhigovyy teploizolyatsionnyy material na osnove trepela Sukholozhskogo mestorozhdeniya Sverdlovskoy oblasti* [Non-fired heat-insulating material based on tripoli from the Sukholozhskoye field, Sverdlovsk region], Russian Federation, 2015, Pat. 2561437. (In Russ.)
3. Zahalkova J., Rovnanikova P. Study of the Effect of Diatomite as a Partial Replacement of Cement in Cement Pastes, *Materials Science Forum*, 2016, vol. 865, pp. 22-26.
4. Mordasov M.D., Nikitin A.V., Polushkin D.L. [Features of structural changes in tripoli during its heat treatment], *Sbornik materialov XVII Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem shkoly-seminara po strukturnoy makrokinetike dlya molodykh uchenykh imeni akademika A. G. Merzhanova* [Collection of materials of the XVII All-Russian with international participation school-seminar on structural macrokinetics for young scientists named after academician A. G. Merzhanov], Chernogolovka, 2019, pp. 139-141, doi: 10.24411/9999-004A-2019-10047 (In Russ.)
5. Mordasova N.A., Zavrazhin D.O., Mordasov D.M. [Study of the tripoli microstructure of the Krasnoslobodsky deposit of the Tambov region], *Sbornik materialov XVII Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem shkoly-seminara po strukturnoy makrokinetike dlya molodykh uchenykh imeni akademika A.G. Merzhanova* [Collection of materials of the XVII All-Russian with international participation school-seminar on structural macrokinetics for young scientists named after academician A. G. Merzhanov], Chernogolovka, 2019, pp. 142-144. doi: 10.24411/9999-004A-2019-10048 (In Russ.)
6. Mordasov D.M., Makeyev P.V., Polushkin D.L., Mordasov M.D. [Study of the structure of a polymer composite material based on ED-20 resin and nanodispersion of a copolymer of styrene and acrylic acid], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 136-141, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.136-141 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kitaygorodskiy A.I. *Rentgenostrukturnyy analiz melkokristallicheskikh i amorfnykh tel* [X-ray structural analysis of fine-crystalline and amorphous bodies], Moscow; Leningrad: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1952, 588 p. (In Russ.)
8. Mikheyev V.I. *Rentgenometricheskyy opredelitel' mineralov* [Roentgenometric determinant of minerals], Moscow: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane nedr, 1957, 868 p. (In Russ.)
9. Jones J.B., Sanders J.V., Segnit E.R. Structure of Opal, *Nature*, 1964, vol. 204, no. 12, pp. 990-991.
10. Dyshin A.A., Bondarenko G.V., Kiselev M.G. [Obtaining  $\alpha$ -cristobalite by drying synthetic opal matrices synthesized by the sol-gel method in supercritical carbon dioxide], *Sverkhkriticheskiye flyuidy: teoriya i praktika* [Supercritical fluids: theory and practice], 2018, vol. 13, no. 4, pp. 94-104. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### Phasenzusammensetzung von Kieselsäure aus der Lagerstätte Krasnoslobodskoye des Tambower Gebiets

**Zusammenfassung:** Es ist die Untersuchung der chemischen und Phasenzusammensetzungen von Tripel aus dem Krasnoslobodskoye-Feld in der Region Tambow mit modernen Geräten durchgeführt. Auf der Grundlage der

Röntgenfluoreszenzanalyse ist die Hauptelementzusammensetzung des untersuchten Gesteins ermittelt, die hauptsächlich durch die Verbindungen von Si, Al, Fe, K, Mg, Ca, Ti, P, S, Na bestimmt wird. Es ist gezeigt, dass der Anteil von Siliziumdioxid in der untersuchten Probe den Gehalt an Tripel aus vielen russischen Lagerstätten und Nachbarländern übersteigt. Die Röntgenphasenanalyse mit anschließender Interpretation des Beugungsmusters zeigte, dass Tripels Zusammensetzungen Mineralien aus amorphem Opal, mikrokristallinen  $\alpha$ - und  $\beta$ -Chrystobalite als Strukturformen von Siliciumdioxid, sowie geringe Mengen an Verunreinigungen aus Quarz, Illit und Montmorillonit enthalten.

---

### **Composition de phase de silice du gisement Krasnoslobodsky de la région de Tambov**

**Résumé:** Est réalisée une étude de la composition chimique et de la phase de la gaize du gisement Krasnoslobodsky de la région de Tambov à l'aide d'équipement moderne. A la base de l'analyse par fluorescence X, est établie la composition élémentaire principale de la roche étudiée, déterminée principalement par les composés Si, Al, Fe, K, Mg, Ca, Ti, P, S, Na. Est montré que la proportion de dioxyde de silicium dans l'échantillon étudié est supérieure à celle de nombreux gisements russes et ceux de pays voisins. L'analyse aux rayons X suivie d'interprétation du diffractogramme a montré que la composition de la gaize comprend des minéraux amorphes d'opale, microcristallins  $\alpha$ - et  $\beta$ -cristobalites comme forme structurale de la silice, ainsi que dans de petites quantités des impuretés de quartz, de l'illite et de la montmorillonite.

---

**Авторы:** *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; *Мордасов Михаил Денисович* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Рухов Артем Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ СИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. О. Козельская<sup>1</sup>, В. В. Котельников<sup>2</sup>, Д. А. Акимов<sup>3</sup>,  
Ю. Г. Кутюрин<sup>1</sup>, О. Н. Будадин<sup>1</sup>

*АО «Центральный научно-исследовательский институт  
специального машиностроения» (1), oleg.budadin@yandex.ru;  
АНО ДПО «Учебный центр «Безопасность в промышленности» (2);  
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (3),  
г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть; композитные конструкции; неразрушающий контроль; промышленные строительные конструкции; ресурс эксплуатации; силовая нагрузка.

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментальных исследований возможности оценки ресурса различных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) при приложении к ним силовых нагрузок (одноосной силовой статической и циклической) на основе анализа результатов их неразрушающего контроля и промышленных строительных объектов с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Показано, что погрешность оценки ресурса эксплуатации конструкций из ПКМ при их нагружении одноосной силовой нагрузкой и циклической нагрузкой с использованием предлагаемого метода не превышает 15 %, а для промышленных строительных объектов формируется зависимость вероятности предаварийного состояния от времени эксплуатации. Полученные данные позволяют своевременно проводить ремонтные работы конструкций или их вывод из эксплуатации и не допустить возникновения аварийных ситуаций.

---

### Введение

Как показывает анализ последних 20 лет степень износа основных фондов в промышленности составляет 37 – 46 %, а доля основных фондов, находящихся в эксплуатации и полностью выработавших свой ресурс, составляет, ориентировочно, 15 %. Поэтому одной из актуальных проблем в развитии промышленности, связанной со снижением аварийных ситуаций и повышением безопасности труда, является оценка ресурса эксплуатации конструкций, работающих в условиях нагрузок для своевременной их замены или ремонта.

Особенно актуально данная проблема стоит для конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые, благодаря своим уникальным характеристикам, занимают все большую нишу в промышленности и промышленных строительных объектах, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

В настоящее время для расчета оценки надежности конструкций из ПКМ и прогноза времени их безаварийной эксплуатации применяются преимущественно методы планового обследования – ускоренных климатических испытаний, разрушающих испытаний и другие, имеющие существенные недостатки.

Статья посвящена одному из перспективных направлений – технологии прогнозирования ресурса эксплуатации конструкций по их текущему состоянию с использованием математического аппарата нейронных сетей. В работах [1 – 5] представлены методы применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для решения различных задач, в том числе оценки ресурса эксплуатации конструкций.

Нейронная сеть для определения ресурса конструкции может быть представлена как совокупность простых данных о связанных друг с другом нейронах, в качестве которых в работе используются результаты неразрушающего контроля (НК) – мониторинга температуры поверхности конструкции в процессе ее силового нагружения.

Нейрон состоит из нескольких входов и одного выхода, сумматора и блока функции, определяющих влияние на остальные нейроны.

Функционально нейрон умножает входную информацию (например, результаты НК) на некоторые коэффициенты (степень влияния прилагаемой нагрузки на ресурс конструкции), суммирует полученные произведения и преобразует в сумму в соответствии с активационной функцией, являющейся пороговой или сигмоидальной. Математически функцию нейрона представим уравнением

$$Y = F\left(\sum_{i=1}^n w_i h_i + w_0\right) = F(WH),$$

где  $W$  – весовые коэффициенты;  $H$  – входная информация (результаты НК);  $F$  – функция активации;  $Y$  – выходной вектор остаточного ресурса.

На рисунке 1 приведена структура трехслойной нейронной сети прямого распространения, используемой для определения ресурса конструкции, где 1-й слой состоит из значений  $h_1, h_2, \dots, h_n$  – входной информации о результатах НК, дефектах, инцидентах с конструкцией в процессе ее эксплуатации и т.п.; 2-й слой является промежуточным, для повышения точности установления функциональной зависимости между входными параметрами и ресурсом конструкции. При необходимости, вводятся значения по текущему состоянию конструкции: внешние факторы, текущие эксплуатационные значения и т.п.; 3-й слой состоит из значения  $y$  – несущей способности, определяемой из спектра  $y \in Y$ .

Обучение ИНС заключается в том, что каждому входному набору данных  $h_1, h_2, \dots, h_n$  определяются степени влияния на другие данные и на ресурс конструкции.

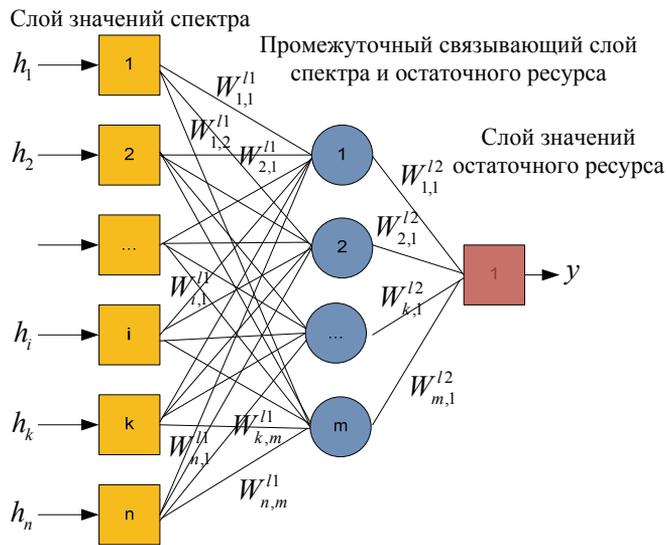
Обучение определено как поиск коэффициентов и параметров нейронной сети, при которых будет выполняться необходимое отображение входного вектора  $H(h_1, h_2, \dots, h_n)$  значений результатов НК в выходное  $Y$  – значение ресурса.

Это достигается путем минимизации суммы разности квадратов между желаемыми выходами и получаемыми ИНС [6]

$$E = \frac{1}{2} \sum_i^M \sum_j^N (y_j(W, H_i) - d_{i,j})^2 \rightarrow \min,$$

где  $d_{i,j}$  – желаемый выход  $j$ -го выходного нейрона для  $i$ -го обучающего примера;  $W$  – матрица весовых коэффициентов ИНС: коэффициенты одного нейрона представлены строкой матрицы  $H_i$ , где  $i$  – обучающий пример.

На основе анализа различных параметров сети (вида нейронов, числа слоев и связей, типов сетей), выполненного в целях оптимальной ИНС для решения задачи определения ресурса конструкции по результатам НК, предлагается пошаговый алгоритм редукции сети с учетом конкуренции связей нейронов между собой.



**Рис. 1. Структура трехслойной нейронной сети, используемая для определения ресурса конструкции**

*Шаг 1.* Задание исходных значений для каждого элемента (нейрона). Основывается на внесении информации НК, сведений о параметрах конструкции, эксплуатационных дефектах.

*Шаг 2.* Ввод значений весовых коэффициентов – степень связи, с которой  $i$ -й нейрон связан с  $j$ -м нейроном следующего слоя. Данные значения могут обуславливаться внешними факторами.

*Шаг 3.* Вычисление значений каждого нейрона по формуле

$$g_i = \frac{S_i}{K}, \quad S_i = \sum_{j=1}^m W_{i,j}^{l1} x_j,$$

где  $S_i$  – сумма произведений всех весов  $i$ -го нейрона на значение соответствующего этому весу  $j$ -го нейрона следующего слоя;  $g_i$  – величина  $i$ -го элемента следующего слоя;  $K$  – коэффициент, который используется для обновления значений нейронов предыдущего слоя,  $K = 1$ ;  $i$  принимает значение  $0 \dots n$ ,  $n$  – число нейронов предыдущего слоя;  $j$  принимает значение  $0 \dots m$ ,  $m$  – число элементов следующего слоя НС.

*Шаг 4.* Обновление значений весов.

$$W_{i,j}^{l1} = \frac{W_{i,j}^{l1} \sum_i (W_{i,j}^{l1})}{(1 - x_i x_j)},$$

где  $W_{i,j}^{l1}$  – значения весов предыдущей итерации.

*Шаг 5.* Если  $W_{i,j}^{l1} \leq 0,001$ , то  $W_{i,j}^{l1} = 0$ . Таким образом происходит сокращение числа конкурирующих между собой нейронов.

*Шаг 6.* Вычисление значений вероятности предаварийного состояния конструкции в условиях ее нагружения.

В случаях, когда прогнозирование осуществляется по косвенным показателям – результатам реакции изделий на прилагаемые нагрузки (например, изменение температурного поля), остаточный ресурс (вероятность предаварийного состояния) будет определяться путем решения уравнения

$$\bar{\varphi}_k(r) + \int_{t_k}^{t_k + \Theta} E\{f_2[q(\tau) | \mathbf{r}]\} dr = 1,$$

где  $\bar{\varphi}_k$  – коэффициент выработки ресурса;  $E$  – интенсивность процесса;  $\mathbf{r}$  – вектор деградации материала;  $q$  – вероятность предаварийного состояния (не разрушения) в текущий момент времени  $\tau$ .

*Шаг 7.* Исследование значений нейронов на противоречие в конкуренции

$$I_i = \sum_{k=1}^n W_{i,k}^{pr} x_i, \quad k \neq i, \quad I_i \geq 0,$$

где  $W_{i,k}^{pr} = W_{i,k}^{pr} - \Delta x_i \Delta x_k$  – обновление значения  $W_{i,k}^{in}$ ;  $W_{i,k}^{pr}$  – значение  $W_{i,k}^{pr}$  на предыдущей итерации;  $\Delta x_i \Delta x_k$  – разница значений  $x_i$  и  $x_k$  на двух итерациях.

*Шаг 8.* Вычисление новых значений нейронов с учетом учета противоречия в конкуренции

$$x_i = \frac{S_i}{K + I_i}.$$

*Шаг 9.* Если значения нейронов не превышают установленного порога, то изменение весов у нейронов прекращают. Иначе, продолжается изменение весов и пересчет значений (переход к шагу 4).

Алгоритм является итерационным и используется для установления наиболее конкурентных связей в ИНС для определения влияний на несущую способность конструкции.

Прогнозирование наступления предельных значений ресурса по критерию увеличения внутренних повреждений основано на концепциях механики разрушения материалов, включая характеристики усталостной и хрупкой прочности.

Данный подход основывается на том, что функция долговечности представляет собой функцию от числа циклов, величины или времени нагрузки до разрушения. Статистическую информацию получают на основе исследования однотипных элементов конструкций, работающих в идентичных условиях эксплуатации, например, методами НК. В этом случае используют приближенные значения числовых характеристик функции распределения по результатам испытаний серий образцов материалов конструкций, находящихся в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Для обучения ИНС проведены серии испытаний однотипных конструкций при приложении к ним одноосных силовых статических и циклических нагрузок с получением результатов НК.

В качестве примера в табл. 1 приведены характеристики изменения одного из параметров, показывающих состояние конструкции при воздействии на нее циклической или одноосной силовой нагрузки – температуры в критической точке поверхности однотипных конструкций (рис. 2), в том числе для случаев разрушения, и некоторые характеристики изменения температуры в процессе приложения нагрузок, по которым проводилось обучение ИНС (градиент изменения температуры в диапазоне времени 15 с – для циклического нагружения и 24 с – для одноосного силового нагружения).

На рисунке 3 представлена установка для проведения экспериментальных исследований.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем:

- в процессе прессования в образец закладывались оптоволоконные линии с волоконными брэгговскими решетками (**ВБР**);
- образец закреплялся в разрывной машине;
- осуществлялось «обучение» нейронной сети на однотипных образцах изделий;

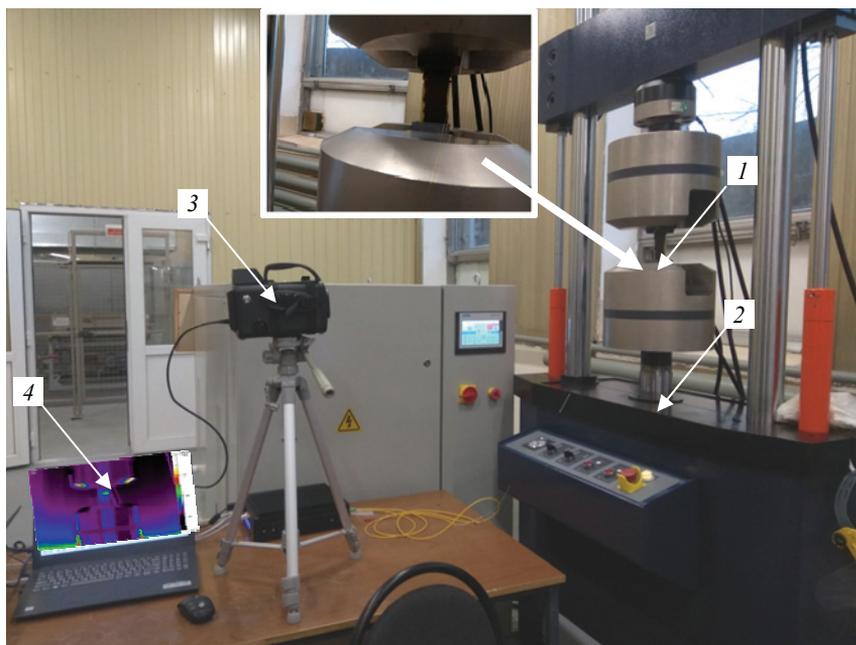
Таблица 1

Изменение температуры от времени циклического нагружения

График изменения температуры от времени	Вид силового нагружения	Комментарии
	Циклическое	Разрушение. Градиент на 15 с 0,095 град/с
		Разрушения нет. Градиент на 15 с 0,04 град/с
		Разрушения нет. Градиент на 15 с 0,03 град/с
	Растяжение	Разрушение (органопластик). Градиент на 24 с 0,026 град/с
		Разрушение (органопластик). Градиент на 24 с 0,025 град/с
		Разрушение (органопластик). Градиент на 24 с 0,45 град/с



**Рис. 2. Образец для проведения экспериментов**



**Рис. 3. Установка для проведения экспериментальных исследований:**

1 – образец; 2 – испытательная машина; 3 – термографическая система «ИРТИС-2000»;  
4 – компьютерная система регистрации и предварительной обработки данных контроля

- перед закрепленным образцом устанавливался термограф «ИРТИС-2000» (включен в реестр средств измерений РФ);
- оптоволоконные линии с ВБР подключались к интеррогатору для измерения деформаций внутри образца;
- образец в разрывной машине нагружался силовой циклической нагрузкой частотой 5 Гц или одноосной силовой нагрузкой; в процессе нагружения термографом регистрировались температурное поле поверхности и деформация материала внутри образца;
- нагружение образца продолжалось в течение заданного интервала времени или до его разрушения;
- после завершения нагружения образца зарегистрированная информация (температурное поле и деформация) обрабатывалась в соответствии с разработанным методом;
- в результате обработки полученной информации вычислялась кривая зависимости вероятности предаварийного состояния от числа циклов нагружения или от величины и времени нагружения, в случае одноосной силовой нагрузки, и сравнивалась рассчитанная величина ресурса (число циклов или величина нагрузки до разрушения, соответствующая 100%-й вероятности предаварийного состояния) с фактическим числом циклов или фактической нагрузкой. Далее определялась погрешность прогнозирования.

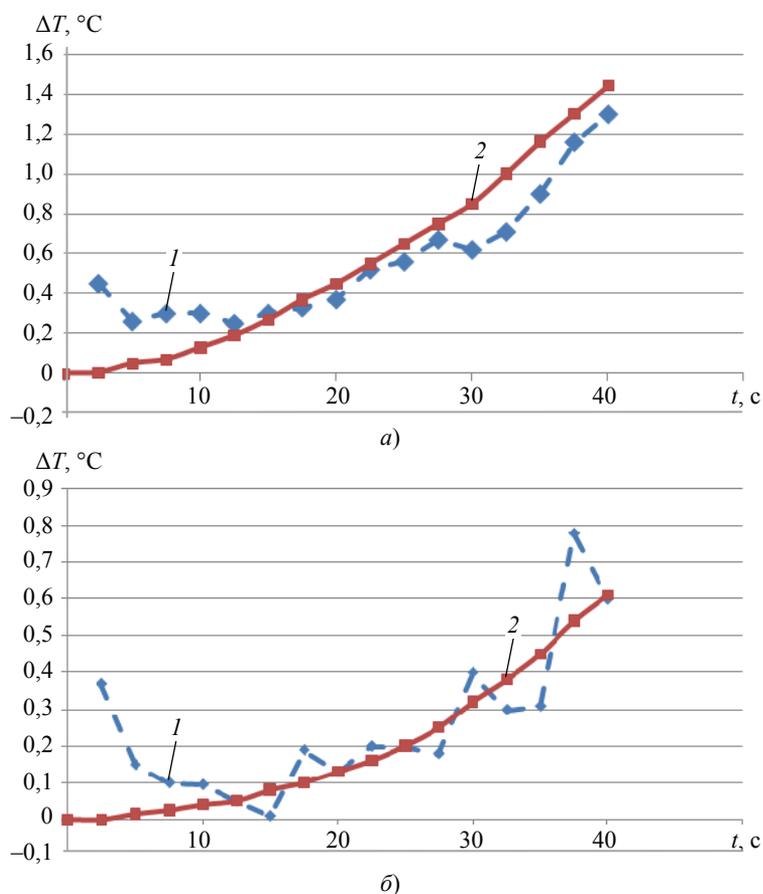
## Экспериментальные исследования на образцах композитных конструкций (лопатках) для условия силового одноосного нагружения

В качестве исходных данных использованы результаты контроля композитных конструкций (лопаток), полученные в [7] – динамическое распределение температуры на поверхности изделия при его одноосном силовом нагружении. На рисунке 4 приведены некоторые графики из [7] – зависимости изменения температуры поверхности исследуемого объекта из ПКМ от времени при одноосном силовом нагружении изделия ( $t$  – время нагружения изделия, с).

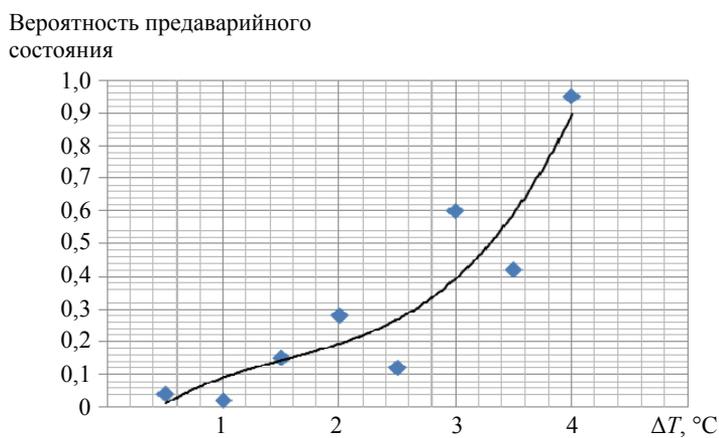
На рисунке 5, в качестве примера, показаны графики эксплуатационной надежности исследуемых образцов, полученные с помощью разработанного метода на базе искусственных нейронных сетей с использованием в качестве исходных данных результаты рис. 4.

Сравнивая графики рис. 4 и 5 сделан ряд выводов:

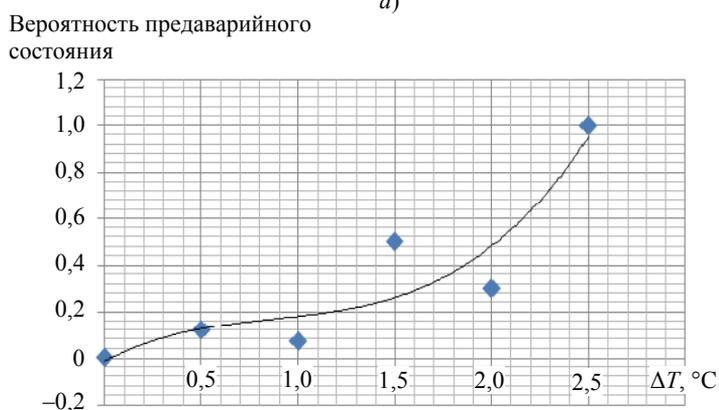
– величина изменения температуры, которая была достигнута в зоне концентратора напряжения при испытании изделия одноосным силовым нагружением в [7], на сороковой секунде составляет 1,6 °С (рис. 4, а), что соответствует



**Рис. 4.** Зависимости изменения температуры  $\Delta T$  поверхности исследуемого объекта в зоне (а) и вне зоны (б) концентратора напряжения в материале от времени  $t$  при одноосном силовом нагружении изделия:  
1 – экспериментальные данные тепловизора;  
2 – расчетная температура в точке избыточного напряжения



a)



б)

**Рис. 5. Зависимости вероятности предаварийного состояния от изменения температуры  $\Delta T$  на поверхности изделия в области (a) и вне (б) концентратора напряжения в материале**

вероятности предаварийного состояния, ориентировочно, 0,15 (рис. 5, a). При этом разрушение контролируемого изделия прогнозируется при достижении температуры поверхности в зоне концентратора напряжения, ориентировочно, 4 °С.

– аналогично, величина изменения температуры, которая была достигнута вблизи зоны концентратора напряжения при испытании изделия одноосным силовым нагружением в [7], на сороковой секунде составляет 0,6 °С (рис. 5, б), что соответствует вероятности предаварийного состояния, ориентировочно, 0,18. При этом разрушение контролируемого изделия прогнозируется при достижении температуры поверхности в зоне концентратора напряжения, ориентировочно, 2,6 °С.

– разница в рассчитанной величине предаварийного состояния по температурным полям в различных точках поверхности исследуемого изделия составляет менее 10 %. Таким образом, измеряя динамическую температуру в различных точках поверхности контролируемого изделия в процессе его нагружения, проводя соответствующую обработку полученных результатов в соответствии с разработанным методом, можно оценивать текущую величину предаварийного состояния и, при необходимости, остановить процесс нагружения изделия или его эксплуатацию.

## Экспериментальные исследования на образцах композитных конструкций (лопатках) для условия силового циклического нагружения

На основе предварительных экспериментальных исследований на ряде образцов проведено обучение нейронной сети процессу оценки ресурса (числу циклов) образцов до их разрушения.

После обучения нейронной сети проведены контрольные экспериментальные исследования для подтверждения достоверности разработанного метода оценки ресурса эксплуатации.

Циклические нагрузки прикладывали к образцам до их разрушения.

На рисунке 6 представлен образец с концентратором напряжения после разрушения; рис. 7 – термограмма образца в процессе испытаний; рис. 8 – графики изменения температуры на поверхности от числа циклов в критических точках образцов – в тех точках, где происходит разрушение образцов (рис. 8, *а, б*, – соответственно образцы с концентратором напряжения и без него).

В процессе циклического нагружения образца температура в области пониженной прочности возрастает до разрушения образца (см. рис. 8, *а*). При разрушении образца происходит лавинообразное увеличение температуры, ориентировочно, на 2 °С. Разрушение образца произошло на 25-м цикле нагружения, при этом температура в месте разрушения составляла, ориентировочно, 28 °С.

Следует отметить, что при увеличении температуры в процессе циклического нагружения наблюдалось предварительные (неполные) разрушения структуры образца в зоне пониженной прочности на 20...40 цикле и 105...110 цикле. Это выражалось в скачкообразном увеличении температуры на 0,3...0,5 °С. Данные изменения температуры могут являться признаками начала разрушения образцов и потенциально – критерием прекращения нагружения образца, не доводя его до разрушения.



Рис. 6. Разрушенный образец с концентратором напряжения после испытания

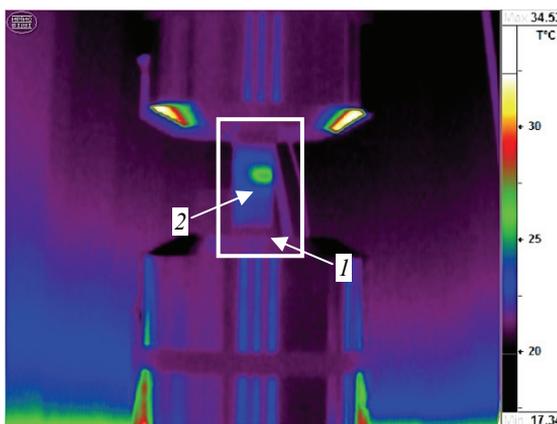
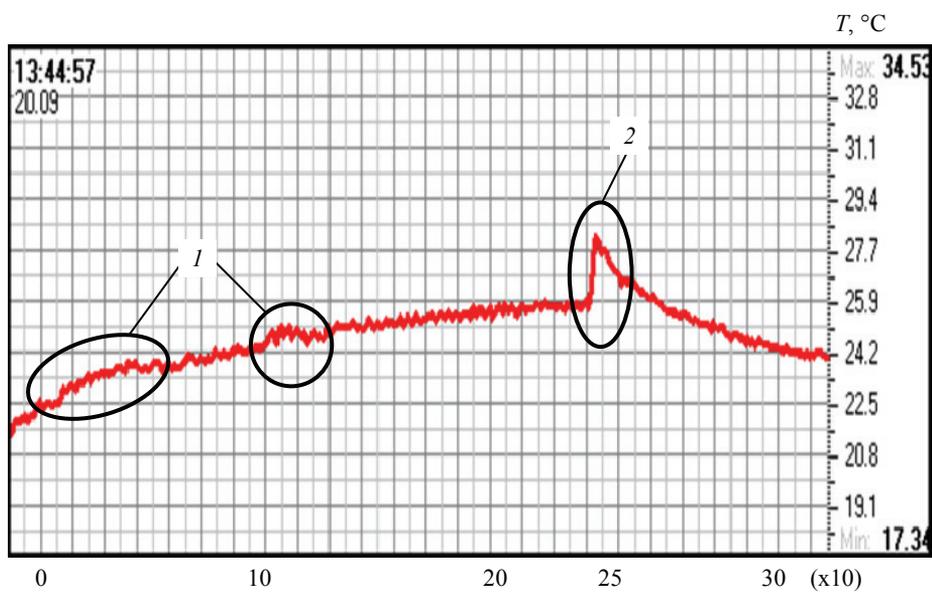
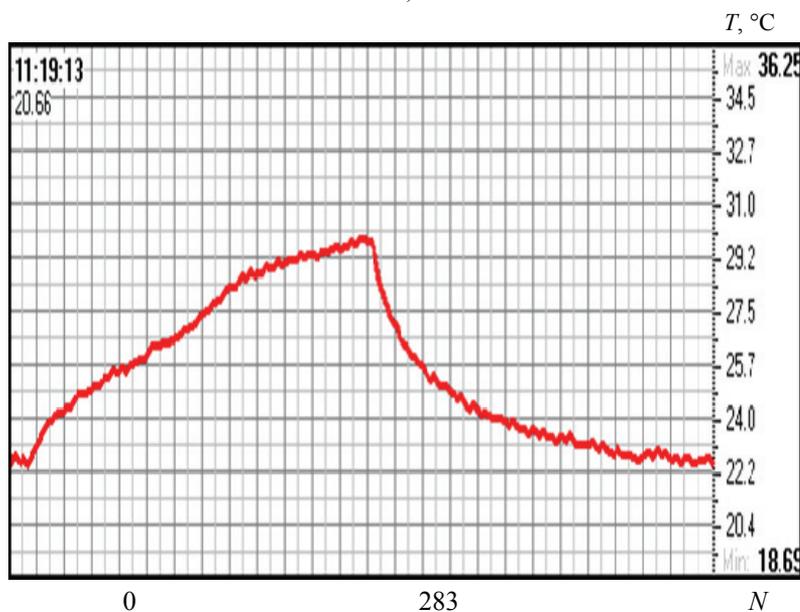


Рис. 7. Термограмма образца 1 и область образца с концентратором напряжения 2



a)

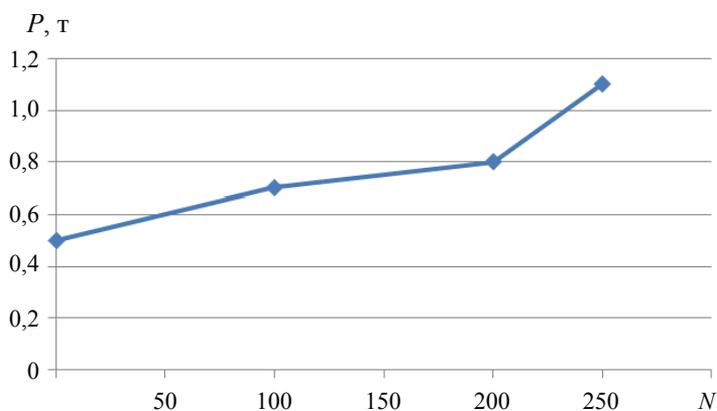


б)

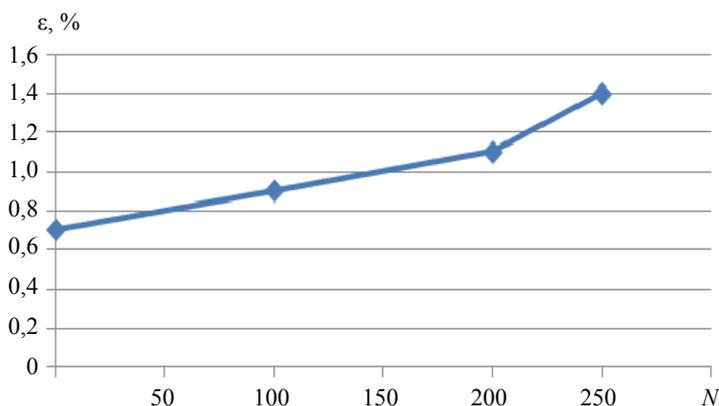
**Рис. 8. Зависимости изменения температуры  $T$  на поверхности образца в области пониженной прочности (а) и критической зоне образца без концентратора напряжения (б) от числа циклов нагружения  $N$ : 1 – область начала разрушения образца; 2 – область разрушения образца**

На рисунке 9 приведена зависимость изменения величины нагружения образца  $P$ , т, от числа циклов нагружения  $N$ ; рис. 10 – зависимость изменения деформации образца  $\epsilon$  от числа циклов нагружения  $N$  и величины нагрузки.

Одновременно на основе результатов обучения и предлагаемого метода оценки ресурса эксплуатации строили кривую зависимости предаварийного состояния



**Рис. 9.** Зависимость изменения величины нагружения  $P$  образца от числа циклов нагружения  $N$



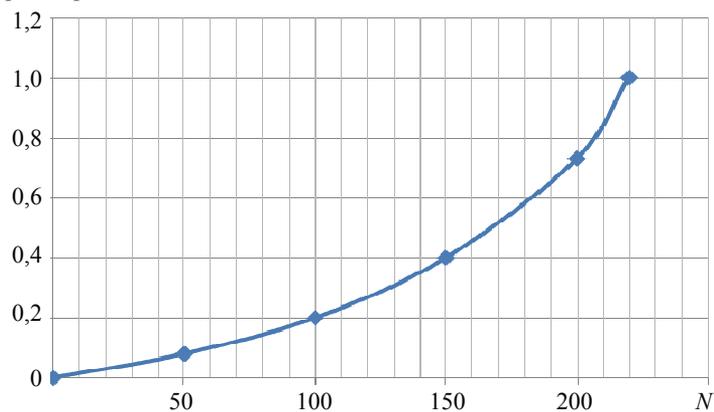
**Рис. 10.** Зависимость изменения деформации образца  $\varepsilon$  от числа циклов нагружения  $N$  и величины нагрузки

испытываемых образцов от числа циклов нагружения. На рисунке 11 показаны графики зависимости предаварийного состояния от числа циклов в критических точках образцов – в тех точках, где происходит разрушение образцов (рис. 11, *a, б*, соответственно образцы с концентратором напряжения и без него). Из данного рисунка видно, что наибольшее различие в количестве циклов, при которых происходит разрушение образцов, фактических и оцененных предлагаемым методом составляет  $\delta = (252 - 220)/252 \times 100 \% = 12,6 \%$ . Такая погрешность вполне приемлема для практического использования.

Экспериментальные исследования разработанного метода оценки ресурса промышленных строительных конструкций проводились на здании единого складского хозяйства ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» (рис. 12). По результатам технической диагностики с применением методов ультразвукового и визуального измерительного контроля определены дефекты на конструкции здания (рис. 13), которые нанесены на схему расположения дефектов, при этом каждому дефекту присвоена категория (весовой коэффициент нейрона).

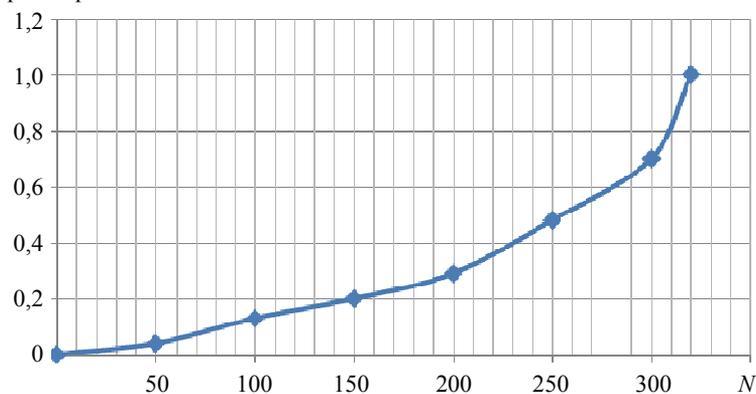
Для получения дополнительной информации проведен прочностной расчет (программный комплекс SCAD) строительной конструкции с учетом выявленных дефектов. По результатам проведенных работ сформирован вектор входных данных для модели прогнозирования и проведено обучение нейронной сети.

Вероятность  
предавварийного состояния



а)

Вероятность  
предавварийного состояния



б)

**Рис. 11. Зависимости вероятности предаварийного состояния в критической зоне образца от числа циклов нагружения  $N$ : а – с концентратором напряжения; б – без концентратора напряжения**



**Рис. 12. Фотография здания единого складского хозяйства**

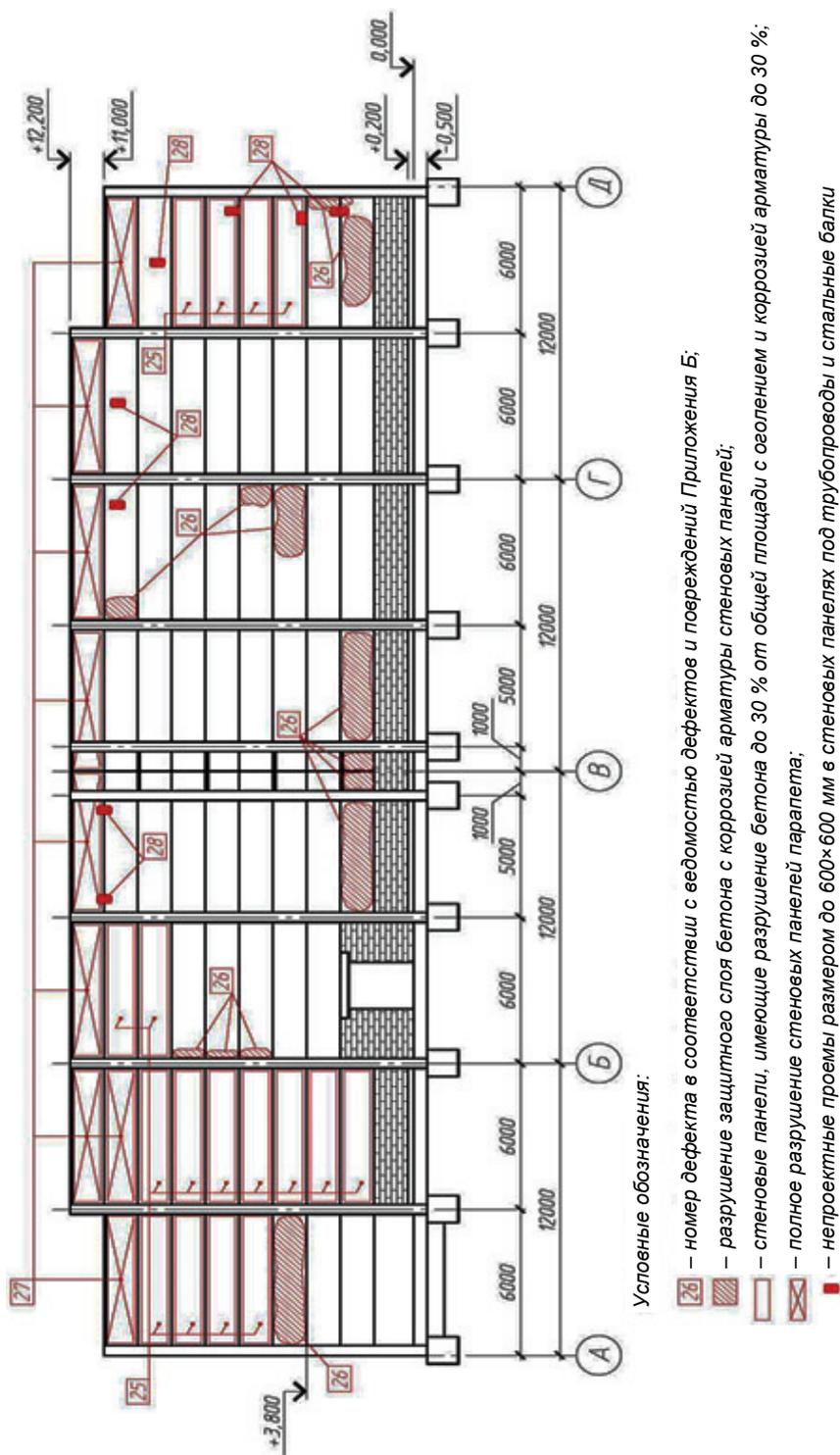
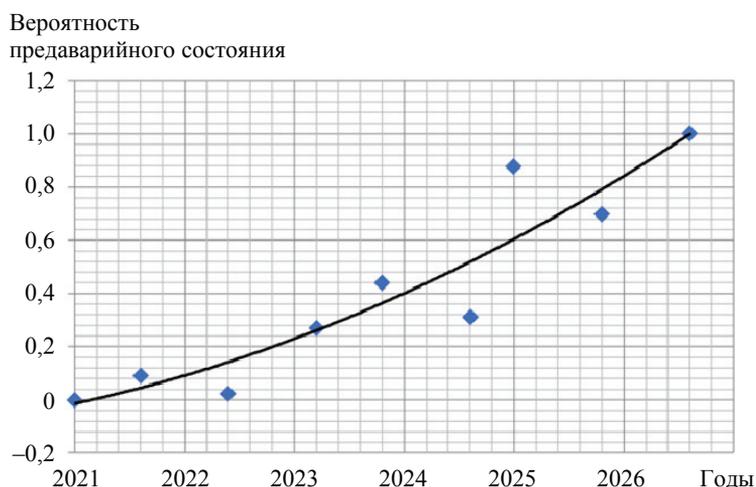


Рис. 13. Схема здания с отмеченными дефектами



**Рис. 14. Прогнозный временной ряд вероятностей предаварийного состояния на основе результатов нейросетевой обработки данных**

На основании полученных данных проведен анализ вероятности предаварийного состояния и построено соотношение с результатами изменений предельного ресурса конструкции. Рисунок 14 наглядно показывает изменение безопасности эксплуатации здания от времени эксплуатации и дату начала ремонтных работ, что позволит исключить аварийную ситуацию.

### Выводы

Экспериментальные исследования показали возможности использования данных неразрушающего контроля для оценки ресурса эксплуатации композитных конструкций в условиях их силового нагружения (статического одноосного и циклического) и промышленных строительных объектов методом искусственного интеллекта на основе распределенных нейронных сетей. Погрешность оценки ресурса эксплуатации композитных конструкций не превышает 15 %, что является вполне приемлемым для практического использования. Зависимость предаварийного состояния от времени эксплуатации промышленных строительных конструкций позволяет принять своевременные меры по их ремонту для исключения аварийных ситуаций.

Реализация предлагаемого подхода позволит создать новое поколение методов испытаний и прогнозирования эксплуатационной устойчивости с оценкой предельного ресурса эксплуатации элементов и конструкций, что, в конечном счете, даст дополнительную возможность для выработки практических рекомендаций по подтверждению или продлению гарантийных сроков эксплуатации и повышению надежности и безопасности эксплуатации конструкций.

### Список литературы

1. Прогнозирование предельного ресурса эксплуатации сложных технических систем на основе прогностического моделирования и элементов искусственного интеллекта / О. Н. Будадин, А. А. Кульков, А. Н. Рыков [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 12. – С. 28 – 33.
2. Созыкин, А. В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей / А. В. Созыкин // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6, № 3. – С. 28 – 59. doi: 10.14529/cmse170303

3. Прогнозирование остаточного ресурса на основе мягких вычислений / Д. А. Акимов, В. В. Котельников, Д. А. Скоसेлева, А. Ю. Дятченкова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2017. – № 1. – С. 20 – 22.

4. Соловьев, Р. А. Автоматическая сегментация спутниковых снимков на базе модифицированной сверточной нейронной сети UNET. – Текст : электронный / Р. А. Соловьев, Д. В. Тельпухов, А. Г. Кустов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (47). – 36 с. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskaya-segmentatsiya-sputnikovyh-snimkov-na-baze-modifitsirovannoy-svyortochnoy-neuronnoy-seti-unet> (дата обращения: 11.02.2021).

5. Recurrent Neural Networks with Backtrack-Points and Negative Reinforcement Applied to Cost-Based Abduction / A. Abdelbar, M. El-Hemaly, E. Andrews, D. C. Wunsch // Neural Networks. – 2005. – Vol. 18, No. 5-6. – P. 755 – 764. doi: 10.1016/j.neunet.2005.06.026

6. Котельников, В. В. Метод проведения мониторинга технического состояния магистральных газопроводов на основе теории искусственных нечетких нейронных сетей / В. В. Котельников // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2016. – № 10-1. – С. 111 – 114.

7. Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения / В. В. Клюев, О. Н. Будадин, Е. В. Абрамова [и др.]. – М. : Спектр, 2017. – 200с.

---

## Experimental Studies of the Possibility of Estimating the Operating Resource of Composite Structures under their Power Loading and Industrial Building Structures

S. O. Kozelskaya<sup>1</sup>, V. V. Kotelnikov<sup>2</sup>, D. A. Akimov<sup>3</sup>,  
Yu. G. Kuturina<sup>1</sup>, O. N. Budadin<sup>1</sup>

*JSC Central Research Institute of Special  
Mechanical Engineering (1), oleg.budadin@yandex.ru;  
ANO DPO Training Center "Safety in Industry" (2);  
MIREA - Russian Technological University (3), Moscow, Russia*

**Keywords:** artificial neural network; composite structures; non-destructive testing; industrial building structures; service life; power load.

**Abstract:** The article presents the results of experimental studies of the possibility of assessing the resource of various structures made of polymer composite materials (PCM) when applying power loads (uniaxial power static and cyclic) to them based on the analysis of the results of their non-destructive testing and industrial building objects using artificial neural networks (ANNs).

It is shown that the error in assessing the service life of structures from PCMs when they are loaded with a uniaxial power load and cyclic load using the proposed method does not exceed 15 %, and for industrial construction objects, the dependence of the probability of a pre-emergency state on the operating time is formed. The data obtained allow timely repair work of structures or their decommissioning and prevent emergencies.

## References

1. Budadin O.N., Kul'kov A.A., Rykov A.N., Kozel'skaya S.O., Morozova T.Yu. [Forecasting the limiting resource of operation of complex technical systems on the basis of predictive modeling and elements of artificial intelligence], *Kontrol'. Diagnostika* [The control. Diagnostics], 2015, no. 12, pp. 28-33. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Sozykin A.B. [Review of methods of teaching deep neural networks], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics], 2017, vol. 6, no. 3, pp. 28-59, doi: 10.14529/cmse170303 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Akimov D.A., Kotel'nikov V.V., Skoseleva D.A., Dyatchenkova A.Yu. [Prediction of the residual resource based on soft calculations], *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy teorii i praktiki. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences], 2017, no. 1, pp. 20-22. (In Russ., abstract in Eng.)
4. <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskaya-segmentatsiya-sputnikovyh-snimkov-na-baze-modifitsirovannoy-svyortochnoy-neyronnoy-seti-unet> (accessed 11 February 2021).
5. Abdelbar A., El-Hemaly M., Andrews E., Wunsch D.C. Recurrent Neural Networks with Backtrack-Points and Negative Reinforcement Applied to Cost-Based Abduction, *Neural Networks*, 2005, vol. 18, no. 5-6, pp. 755-764, doi: 10.1016/j.neunet.2005.06.026
6. Kotel'nikov V.V. [Method of monitoring the technical condition of main gas pipelines based on the theory of artificial fuzzy neural networks], *Novaya nauka: strategii i vektory razvitiya* [New science: strategies and vectors of development], 2016, no. 10-1, pp. 111-114. (In Russ.)
7. Klyuyev V.V., Budadin O.N., Abramova Ye.V., Pichugin A.N., Kozel'skaya S.O. *Teplovoy kontrol' kompozitnykh konstruksiy v usloviyakh silovogo i udarnogo nagruzheniya* [Thermal control of composite structures in conditions of power and shock loading], Moscow: Spektr, 2017, 200 p. (In Russ.)

---

## Experimentelle Studien zur Möglichkeit der Bewertung der Lebensdauer von Verbundkonstruktionen unter ihrer Kraftbelastung und Industriebaukonstruktionen

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse experimenteller Studien zur Möglichkeit, die Ressource verschiedener Strukturen aus Polymerverbundwerkstoffen (PVS) bei Anwendung von Kraftbelastungen (einachsige Kraft statisch und zyklisch) auf sie zu bewerten, basierend auf der Analyse der Ergebnisse ihrer zerstörungsfreien Test- und Industriegebäudeobjekte mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN), vorgestellt.

Es ist gezeigt, dass der Fehler bei der Beurteilung der Lebensdauer von Konstruktionen von PVS, wenn sie mit einer einachsigen Leistungslast und einer zyklischen Last unter Verwendung des vorgeschlagenen Verfahrens belastet werden, nicht mehr als 15 % übersteigt, und für Industriebauobjekte wird die Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit eines störfallnahen Zustands von der Betriebszeit gebildet. Die erhaltenen Daten ermöglichen rechtzeitige Reparaturarbeiten an Baukonstruktionen oder deren Stilllegung und verhindern Notfälle.

## **Études expérimentales sur la possibilité d'évaluer la capacité d'exploitation des structures composites sous charge de force et des structures de construction industriels**

**Résumé:** Sont présentés les résultats de la recherche expérimentale de la possibilité d'évaluer le rendement des conceptions différentes de polymères des matériaux composites (PMC) lors du chargement de force (uniaxe de force statique et cyclique) à la base de l'analyse des résultats de leur contrôle non destructif et des objets avec l'emploi des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Est montré que l'erreur de l'estimation de la durée de vie des structures à partir de PMC lors du chargement uniaxe de force statique et cyclique avec l'utilisation de la méthode proposée ne dépasse pas 15 %, et pour les objets industriels, la probabilité d'état de pré-accident dépend du temps d'exploitation. Les données obtenues permettent de réparer ou de mettre hors service les structures en temps voulu et d'éviter les situations d'urgence.

---

**Авторы:** *Козельская Софья Олеговна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»; *Котельников Владимир Владимирович* – кандидат технических наук, директор АНО ДПО «Учебный центр «Безопасность в промышленности»; *Акимов Дмитрий Александрович* – кандидат технических наук, начальник лаборатории, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»; *Кутюрин Юрий Григорьевич* – кандидат технических наук, начальник лаборатории, ведущий научный сотрудник; *Будадин Олег Николаевич* – доктор технических наук, главный научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Москва, Россия.

**Рецензент:** *Далинкевич Андрей Александрович* – доктор химических наук, главный научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Москва, Россия.

## НАНОМАТЕРИАЛЫ В ТЕПЛОВЫХ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКАХ ТОКА

В. В. Емцев<sup>1</sup>, С. В. Гришин<sup>2</sup>, Д. И. Максимов<sup>3</sup>,  
Ю. Е. Мамонтова<sup>3</sup>, Ю. А. Стекольников<sup>3</sup>

*ФГКВООУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (1); г. Воронеж, Россия; ОАО «Энергия» (2); кафедра химии (2), chemic57@mail.ru; ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина», г. Елец, Липецкая обл., Россия*

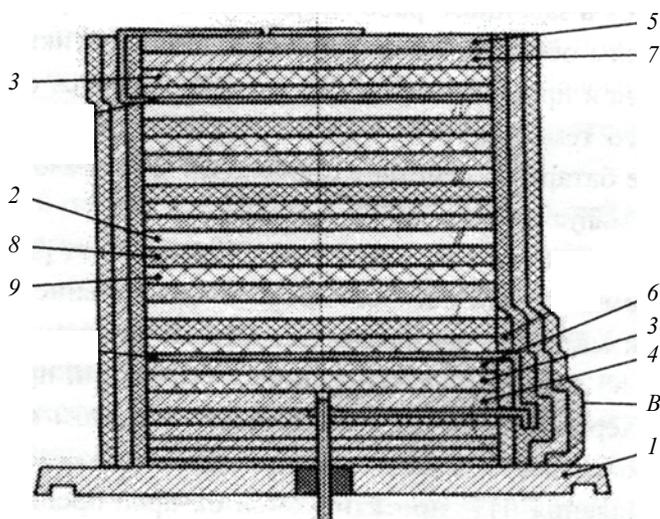
**Ключевые слова:** анодные электроды на основе лития и его сплавов с кремнием и бором; катоды из дисульфидов железа и кобальта; наноматериалы; пиротехнические материалы; резервные тепловые источники тока; электролиты-расплавы.

**Аннотация:** Представлены вольтамперные характеристики тепловых батарей с анодами на основе лития и его сплавов, с катодами из дисульфидов железа или кобальта. Электролит-расплав представляет собой загущенную смесь фторидов, хлоридов лития и калия, пиротехнические смеси из нанопорошков железа, молибдена, титана. Показана перспективность использования литий-борного композита и композита «загущенный литий» в качестве материала для анодов высокоэнергетических тепловых источников тока, а для катодов – смеси на основе синтетического дисульфида железа.

---

Тепловые батареи – единственный тип химических источников тока, удовлетворяющий требованиям ракетной техники, поскольку они имеют: срок сохранности свыше 20 лет, температурный диапазон  $\pm 60$  °С, очень большие разрядные токи, устойчивость к механическим и климатическим воздействиям, быстрый выход на режим, относительно невысокие цены. Современные исследования в области создания и исследования наноматериалов позволяют значительно модернизировать существующие активные массы электродов традиционных электрохимических систем. Их использование в литиевых тепловых источниках тока (ИТ) позволит решить задачи повышения удельных характеристик, коэффициента полезного использования масс электродов электрохимических элементов (ЭХЭ), снизить внутреннее сопротивление, повысить скорость горения пиротехники. Ожидаемое увеличение удельных характеристик литий-ионных аккумуляторов с наноматериалами 30 – 50 %, тепловых ИТ – 80 – 90 % [1, 2]. При разработке тепловых литиевых ИТ перспективно использование литий-борного компонента для изготовления анодов в виде порошковых наноматериалов, в качестве активного компонента катодной массы дисульфидов железа или кобальта, загустителя электролита – гамма-алюмината лития, для горючего пиротехники – порошков металлов с удельной поверхностью от 3,5 м<sup>2</sup>/г и диаметром частиц от 900 нм и меньше, для загущения анодной массы порошки железа с аналогичными свойствами.

Цель работы – разработка технологии использования наноматериалов при изготовлении ИТ на основе батареи БТ-300 (ОАО «Энергия», г. Елец). Общий вид конструкции блока электродов тепловой батареи представлен на рис.1.

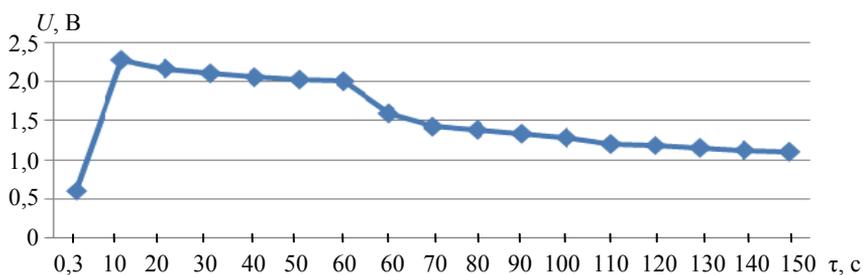


**Рис. 1. Общий вид конструкции блока электродов БТ:**

1 – крышка с положительным контактом; 2 – анод литиевый; 3 – коллекторы тока с контактами; 4, 7 – изолирующие прокладки; 5 – пластина для приварки стяжек; 6 – электроизоляция блока; 8, 9 – тепловая и катодная таблетки соответственно

Для существенного повышения удельных характеристик с использованием наноматериалов проведены опытные работы по следующим направлениям.

*Анодные материалы для замены литий-кремниевого сплава.* Проведены испытания спрессованного анода из порошка литий-алюминиевого сплава с содержанием лития 20 вес.% и температурой плавления 700 °С в ЭХЭ 21 мм (без корпуса), катода на основе серного колчедана в количестве 0,4 г и электролита из смеси LiCl-KCl-LiF 0,3 г при температуре разряда 600 °С (ток разряда батареи БТ-300 по техническому заданию (ТЗ) 3,3 А в течение 20 с, напряжение при разряде не менее 1,6 В), которые показали, что при разряде на нагрузку 0,6 Ом в течение 60 с, не обеспечивается выполнение требований ТЗ (рис. 2). Однако данный состав анодной массы можно вполне использовать для батарей, где заданы малые токи разряда, то есть в миниатюрных источниках тока с диаметром анода 0,5 мм. Электрические характеристики ЭХЭ определялись в ячейке, помещенной в разрядную печь, представляющую собой два цилиндрических нагревателя с регулятором температуры диаметром 120 мм, один из которых имеет пневмопривод и подвижен. Фактически разряд ЭХЭ проводился в условиях, имитирующих давление и температуру в ИТ при разряде. Регистрация разрядных характеристик ЭХЭ при разрядке на постоянную нагрузку осуществлялась на цифровом осциллографе SDS-200.



**Рис. 2. Разрядная кривая ЭХЭ с анодом из литий-алюминиевого сплава**

В качестве анода исследован композитный материал Li-B (КНР), раскатанный в фольгу, содержащий матрицу  $\text{Li}_7\text{B}_6$ , пропитанную литием, состава  $(54 \pm 4)$  вес.% бора, остальное магний. Испытания ЭХЭ с анодом диаметром 21мм, катодом на основе серного колчедана 0,4 г и электролитом из смеси  $\text{LiCl-KCl-LiF}$  0,3 г на нагрузку 0,6 Ом показали, что обеспечивается выполнение требований ТЗ с достаточным запасом (рис. 3).

Проанализирован композитный материал (производства УНИХИМ, г. Екатеринбург), раскатанный в фольгу, отвечающий формуле  $\text{Li}_5\text{B}_4$ , в составе около 67 вес.% лития, 33 вес.% бора, остальное магний. Испытания подтвердили выполнение требований ТЗ на ЭХЭ при его диаметре 21 мм, катода на основе серного колчедана 0,4 г и электролита из смеси  $\text{LiCl-KCl-LiF}$  0,3 г, при разряде на нагрузку 0,6 Ом с достаточным запасом (рис. 4). При изготовлении анода используется смесь кристаллического и аморфного бора, что позволяет снизить температурный разбег экзотермических реакций при синтезе композита. Однородность литий-борного компонента обеспечивается гомогенизацией смеси расплавленного лития и порошка бора пальчиковой мешалкой в температурном интервале 350...450 °С при исключении застойных зон по объему одноразового сменного тигля (для облегчения извлечения готового продукта) при синтезе в реакторах.

Изготовлены аноды из композитного материала «загущенный литий» в виде фольги с содержанием 20 вес.% лития, 80 вес.% порошка железа марки КЖМ (карбонильное железо модифицированное) по оригинальной технологии на ОАО «Энергия», г. Елец. Частицы порошка железа КЖМ (производства концерна «Вега») имеют высокую удельную поверхность ( $3,5 \text{ м}^2/\text{г}$ ) по сравнению с порошками,

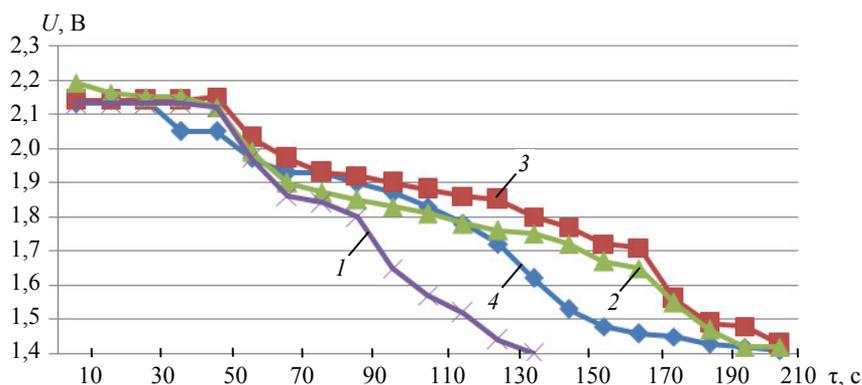


Рис. 3. Разрядные кривые при различных температурах для ЭХЭ с анодом Li-B: 1 – 450; 2 – 500; 3 – 550; 4 – 600

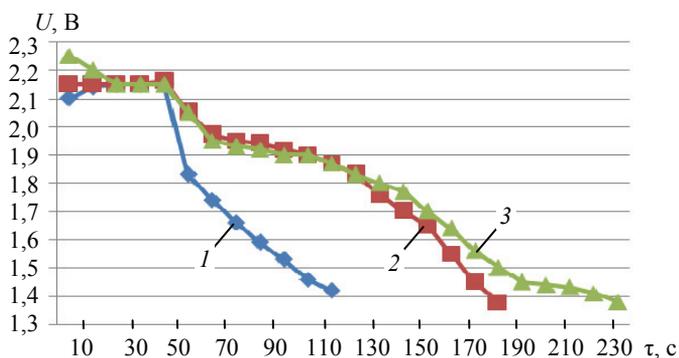
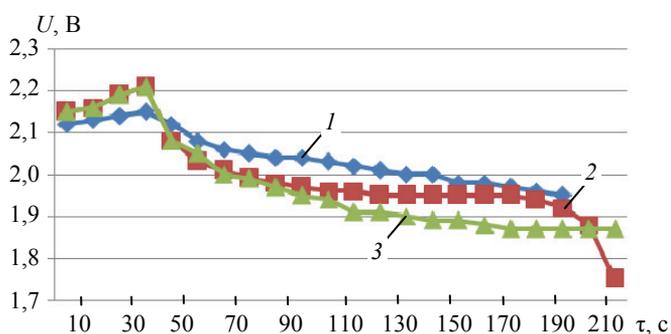


Рис. 4. Разрядные кривые при различных температурах для ЭХЭ с анодами: 1 – контрольный образец; 2 –  $\text{Li}_7\text{B}_6$ ; 3 –  $\text{Li}_5\text{B}_4$

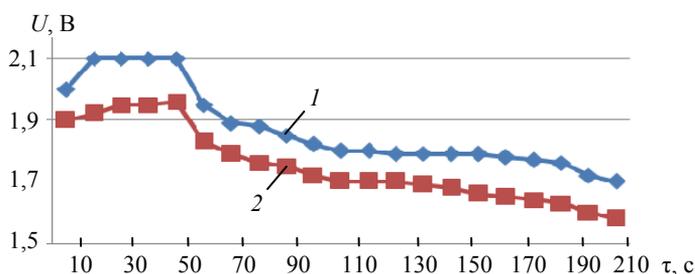
применяемыми в изделиях до  $0,5 \text{ м}^2/\text{г}$ . Сравнительные испытания ЭХЭ с таким анодом в корпусе и стандартным катодом на основе серного колчедана, а также стандартным электролитом показали, что при разряде на нагрузку  $0,6 \text{ Ом}$  обеспечиваются увеличенные по сравнению с ЭХЭ на литий-кремниевом аноде разрядные характеристики элементов диаметром  $35 \text{ мм}$  при подключении на  $60 \text{ с}$ , катода для всех ЭХЭ на основе серного колчедана  $2,3 \text{ г}$  и электролита из смеси  $\text{LiCl-KCl-LiF}$  (рис. 5).

Исследован вариант композитного материала «загущенный литий» разработкой ФГБОУ ВО «Липецкий технический университет». Испытания ЭХЭ с таким анодом толщиной  $0,5 \text{ мм}$ , содержащим металлический войлок из волокон алюминия, электролитически пропитанных литием, показали, что пока не обеспечивается выполнение требований ТЗ с достаточным запасом при разряде на нагрузку  $0,6 \text{ Ом}$  (диаметр  $35 \text{ мм}$ , стандартные литий-кремниевый анод и электролит, разряд в течение  $60 \text{ с}$ , масса катода и электролита из смеси  $\text{LiCl-KCl-LiF}$  для всех ЭХЭ  $2,3 \text{ г}$ ) (рис. 6). Возможно, требуется доработка материала в направлении увеличения количественного содержания лития в электроде.

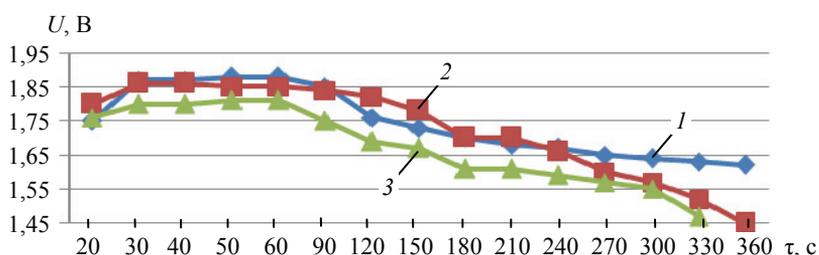
*Катодные материалы с заменой серного колчедана.* Для замены серного колчедана в составе катода предлагается использовать дисульфид кобальта (материал с большей теоретической емкостью), термически устойчивый в интервале рабочих температур теплового ИТ. Испытания ЭХЭ с катодом на основе дисульфида кобальта, стандартными литий-кремниевым анодом и электролитом показали, что при разряде на нагрузку  $0,6 \text{ Ом}$  (диаметр  $35 \text{ мм}$ , стандартные литий-кремниевый анод и электролит, время разряда  $60 \text{ с}$ , масса катода и электролита из смеси  $\text{LiCl-KCl-LiF}$  для всех ЭХЭ  $2,3 \text{ г}$ ) обеспечивается выполнение требований ТЗ на батарею БТ-300 (рис. 7).



**Рис. 5. Разрядные кривые стандартного ЭХЭ (контрольный образец) и ЭХЭ с анодом из материала «загущенный литий»:**  
1 – контрольный образец, 600; 2 – 550; 3 – 600



**Рис. 6. Разрядные кривые ЭХЭ с катодом на основе дисульфида кобальта:**  
1 – контрольный образец; 2 – дисульфид кобальта



**Рис. 7. Разрядные кривые ЭХЭ с различными катодами:**

1 – дисульфид железа; 2 – контрольный образец; 3 – дисульфид кобальта

Из данных рис. 7 следует, что разрядные характеристики ЭХЭ со стандартными электродами выше, чем у ЭХЭ с катодом на основе порошка дисульфида кобальта. Известно, что разрядная емкость катодов на основе дисульфидов переходных металлов (Fe, Co, Ni) и импеданс дисульфидных электродов является функцией электродного потенциала и размера структурных микрометрических частиц [3]. По видимому, повышения разрядных характеристик катода можно добиться, уменьшая размеры частиц порошка дисульфида кобальта с 30 мкм до нанометровых размеров.

Исследована замена серного колчедана на синтетический дисульфид железа. Испытания ЭХЭ с катодом на основе дисульфида железа, стандартным литий кремниевым анодом и стандартным электролитом показали, что при разряде на нагрузку 0,6 Ом обеспечивается лучшее выполнение требований ТЗ на батарею БТ-300, чем у ЭХЭ со стандартными электродами (см. рис. 7). Возможно дальнейшее улучшение разрядных характеристик за счет уменьшения размера частиц порошка железа с 30 мкм на 900 нм и менее.

*Электролит с заменой загустителя.* Электролит с гамма-алюминатом лития (до 10 вес.%) в качестве загустителя. Гамма-алюминат лития имеет высокую удельную поверхность и проводимость по иону лития. Испытания ЭХЭ с данным электролитом будут проведены после разработки технологии его получения из карбоната лития или гамма-оксида алюминия и подбора оптимальной рецептуры электролитной смеси.

*Новые тепловые смеси.* Тепловые источники тока активируются теплом специальной пиротехники на основе тепловой смеси из порошка железа и перхлората калия [4]. Используемые порошки железа с размером 3...10 мкм подлежат замене на порошки нанометрического размера. Испытания тепловой смеси с нанопорошками железа показали удельное тепловыделение (порядка 1100 Дж/г), которое соответствует показателю стандартной смеси, что позволяет рекомендовать нанопиротехнику к использованию без перерасчета теплового баланса. Скорость горения образцов новой тепловой смеси (70...95 мм/с) превосходит показатели стандартной смеси в 1,5–2 раза, что в итоге значительно уменьшает время выхода на режим тепловых ИТ.

*Тепловая смесь с заменой порошка молибдена на порошок титана марки ПТОМ-1.* Тепловой эффект реакции горения титана в 2 раза выше, чем у реакции горения железа или молибдена, при том, что удельный вес титана намного ниже удельного веса молибдена. Испытания тепловых таблеток с титаном показали, что по удельному тепловыделению и скорости горения они не пригодны для использования в качестве тепловой смеси для изготовления тепловых ИТ. В таблицах 1, 2 приведены характеристики тепловых батарей.

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики удельной энергии разработанных батарей, которые не уступают батареям, выпускаемым американской фирмой Eagle Picher Technologies, имеющих близкие габаритно-весовые

Таблица 1

**Сравнительные данные ЭХЭ с различным составом анода  
при температуре 550 °С**

Анод	Время работы, $\tau_p$ , с		Средний ток, $I_{cp}$ , А	Емкость элемента до 0,8 $U_{max}$ , $Q$ , А·с	Удельная емкость сплава, $Q_{уд}$ (А·с)/г
	до 1,5 В	до 0,8 $U_{max}$			
Li-Si, масса 0,1 г, 50 масс.% Li	44	47	2,73	128	1 280
Li-B (КНР), масса 0,19 г, 55 масс.% Li	130	120	2,93	352	1 850
Li-B (г. Екатеринбург), масса 0,11...0,12 г, 67 масс.% Li	115	100	3,07	307	2 560

Таблица 2

**Результаты испытаний батарей БТ-300 с использованием ЭХЭ анода Li-B**

Температура, °С	$\tau_{вр}$ , с	$U_{max}$ , В	$\tau_{24В}$ , с	Примечание
-50	0,35	29,3	46	$R_{const} = 7,8 \text{ Ом}$ $I_{max} = 3,76 \text{ А}$ ( $i = 770 \text{ мА/см}^2$ )
0	0,32	29,8	44	$I_{const} = 3,3 \text{ А}$ ( $i = 670 \text{ мА/см}^2$ )
+50	0,22	30,3	74	$P_{const} = 90 \text{ Вт}$ $I_{средн} = 4,0 \text{ А}$ ( $I = 820 \text{ мА/см}^2$ )
0	0,20	30,0	66	$P_{const} = 90 \text{ Вт}$ $I_{средн} = 4,0 \text{ А}$ ( $I = 820 \text{ мА/см}^2$ )
Требования ТЗ				
+50 -50	$\leq 0,5$	$\leq 31,0$	$\geq 20,0$	$I_{const(27 В)} = 3,3 \text{ А}$

характеристики, где  $\tau_{вр}$  – время выхода на режим;  $U_{max}$  – максимальное напряжение;  $\tau_{24В}$  – продолжительность работы до 24 В;  $R_{const}$  – постоянное сопротивление;  $I_{max}$ ,  $I_{средн}$  – максимальный и средний токи соответственно;  $P_{const}$  – постоянная мощность.

*Выводы.* Перспективными материалами для анодов высокоэнергомощных тепловых ИТ являются литий-борный композит и композит «загущенный литий», а для катодов – смеси на основе синтетического дисульфида железа. Для повышения разрядных характеристик катодов на основе покупных дисульфидов необходимо уменьшать их размеры до нанометровых. Повышение скорости горения тепловой смеси можно добиться, используя рецептуры составов на основе нанопорошков железа марки КМЖ. Время задействия тепловой батареи при использовании наноматериалов (900 нм) составляет 0,03 с по сравнению с 0,1...0,2 с для порошков с размерами 30 мкм.

### Список литературы

1. Highly Reversible Lithium Storage in Nanostructured Silicon / J. Graetz, C. C. Ahn, R. Yazami, B. Fultz // *Electrochemical and Solid-State Letters*. – 2003. – Vol. 6, No. 9. – P. A194 – A197.
2. Кедринский, И. А. Литиевые источники тока / И. А. Кедринский, Е. Е. Дмитренко, И. И. Грудянов. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
3. Банник, Н. Г. Исследование электродной кинетики интеркаляции ионов лития в электролитический FeS<sub>2</sub> композит / Н. Г. Банник, В. П. Тысячный, Р. Д. Апостолова // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2006. – № 4. – С. 151.
4. Кукоз, Ф. И. Тепловые химические источники тока / Ф. И. Кукоз, В. В. Трущ, В. И. Кондратенков. – Ростов н/Д : Изд-во РГУ, 1989. – 219 с.

---

## Nanomaterials in Thermal Backup Current Sources

V. V. Emtsev<sup>1</sup>, S. V. Grishin<sup>2</sup>, D. I. Maksimov<sup>3</sup>,  
Yu. E. Mamontova<sup>3</sup>, Yu. A. Stekolnikov<sup>3</sup>

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force  
“Air Force Academy named after Professors N. Ye. Zhukovsky  
and Yu. A. Gagarin” (1), Voronezh, Russia; JSC Energia (2);  
Department of Chemistry (3), chemic57@mail.ru;  
I. A. Bunin Yelets State University; Yelets, Lipetsk region, Russia*

**Keywords:** anode electrodes based on lithium and its alloys with silicon and boron; iron and cobalt disulfide cathodes; nanomaterials; pyrotechnic materials; backup thermal current sources; electrolytes, melts.

**Abstract:** The current-voltage characteristics of thermal batteries with anodes based on lithium and its alloys, with cathodes made of iron or cobalt disulfides are presented. The electrolyte-melt is a thickened mixture of fluorides, lithium and potassium chlorides, pyrotechnic mixtures of iron, molybdenum, titanium nanopowders. It is shown that the use of a lithium-boron composite and a “thickened lithium” composite is promising as a material for anodes of high-energy thermal current sources, and for cathodes - a mixture based on synthetic iron disulfide.

### References

1. Graetz J., Ahn C.C., Yazami R., Fultz B. Highly Reversible Lithium Storage in Nanostructured Silicon, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2003, vol. 6, no. 9, pp. A194-A197.
2. Kedrinskiy I.A., Dmitrenko Ye.Ye., Grudyanov I.I. *Litiyevyye istochniki toka* [Lithium current sources], Moscow: Energoatomizdat, 1992, 240 p. (In Russ.)
3. Bannik N.G., Tsyachnyy V.P., Apostolova R.D. [Investigation of the electrode kinetics of intercalation of lithium ions into an electrolytic FeS<sub>2</sub> composite], *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Questions of chemistry and chemical technology], 2006, no. 4, p. 151. (In Russ.)
4. Kukoz F.I., Trushch V.V., Kondratenkov V.I. *Teplovyye khimicheskiye istochniki toka* [Thermal chemical sources of current], Rostov n/D: Izdatel'stvo RGU, 1989, 219 p. (In Russ.)

## Nanomaterialien in thermischen Reservestromquellen

**Zusammenfassung:** Es sind die Strom-Spannungs-Eigenschaften von Thermobatterien mit Anoden auf Lithium- und Legierungsbasis mit Kathoden aus Eisen- oder Kobaltdisulfiden vorgestellt. Die Elektrolytschmelze ist eine eingedickte Mischung aus Fluoriden, Lithium- und Kaliumchloriden, pyrotechnischen Gemischen aus Eisen-, Molybdän- und Titananopulvern. Es ist gezeigt, dass die Verwendung eines Lithium-Bor-Verbundstoffs und einer "verdickten Lithium"-Verbindung als Material für Anoden energiereicher Wärmestromquellen, und für Kathoden - eine Mischung auf Basis von synthetischem Eisendisulfid, vielversprechend und perspektivisch ist.

---

## Nanomatériaux dans les sources de courant auxiliaires thermiques

**Résumé:** Sont présentées les caractéristiques voltamétriques des batteries thermiques avec des anodes à base de lithium et de ses alliages avec des cathodes à base de disulfure de sodium ou de cobalt. L'électrolyte fondu est un mélange épaissi de fluorures, de chlorures de lithium et de potassium, de mélanges pyrotechniques de nanopoudres de fer, de molybdène et de titane. Est montrée l'utilisation prometteuse du composite lithium-bore et du composite «lithium épaissi» en tant que matériau pour les anodes de sources de courant thermique à haute énergie et pour les cathodes – mélange à base de disulfure de fer synthétique.

---

**Авторы:** *Емцев Виталий Валерьевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель, ФГКВБОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; *Гришин Сергей Викторович* – начальник лаборатории новых материалов, ОАО «Энергия»; *Максимов Дмитрий Игоревич* – аспирант кафедры химии; *Мамонтова Юлия Евгеньевна* – аспирант кафедры химии; *Стекольников Юрий Александрович* – кандидат химических наук, профессор кафедры химии, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина», г. Елец, Липецкая обл., Россия.

**Рецензент:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Алексеев Сергей Юрьевич**

**Sergey Alekseev**

Начальник сектора по разработке автоматизированных средств и систем АО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов.

26 декабря 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Методология структурно-параметрического синтеза системы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации тепло- и массообменного оборудования» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии).



Работа выполнена на кафедрах «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» и «Техника и технология производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Е. Н. Туголуков.

В диссертационной работе разработана научная концепция структурно-параметрического синтеза системы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации тепло- и массообменного оборудования на основе программных абстракций элементов технической системы. Предложены принципы декомпозиции технической системы, методы разработки, алгоритмы функционирования и взаимодействия программных абстракций, в основу которых положено представление множества возможных состояний технической системы, определяемого аналитическими решениями дифференциальных уравнений в частных производных. Разработаны и внедрены тренажерный комплекс виртуальной/дополненной реальности для отработки навыков дыхания в изолирующих дыхательных аппаратах, библиотека программных элементов, предназначенных для синтеза системы поддержки принятия решений в тренажерных комплексах виртуальной реальности, встроенная система поддержки принятия решений для тренажера изолирующего дыхательного аппарата, обеспечивающая получение информации о нестационарном температурном поле потока газовой смеси, движущегося по каналу в трактах тренажера.

Созданы методы и алгоритмы, уменьшающие затраты на разработку программных систем обработки информации о режимах функционирования тепло- и массообменного оборудования на основе аналитических решений дифференциальных уравнений в частных производных, сокращающие время получения расчетных результатов и обеспечивающие возможность синтеза таких программных систем специалистами в прикладной области. Представлены предложения по разработке структуры проблемно-ориентированного языка программирования для системы принятия решений и развития методов ее автоматизированного синтеза.

Приказом Минобрнауки России от 21 октября 2020 года № 617/нк-26 С. Ю. Алексееву присуждена ученая степень доктора технических наук.

*Область научных исследований:* инженерия программного обеспечения для технических систем.

## Альшика Недал

Химик Центральной лаборатории, ООО «Управляющая компания КРАТА» ПАО «Пигмент», г. Тамбов.

22 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Ингибирование коррозии углеродистой стали в средах нефтедобычи» на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Научный руководитель – д-р хим. наук, профессор Л. Е. Цыганкова.

Работа выполнена на кафедре химии ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина».

*Область научных интересов:* ингибирование коррозии углеродистой стали посредством композиций азотсодержащих соединений и гидрофобизации поверхности.

---

## Жигулин Станислав Юрьевич

Инженер-технолог, ООО «Научно-производственное предприятие «Система», г. Тверь.

10 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Разработка компьютерного эффузионного анализатора плотности газов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Л. В. Илясов.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет».

*Область научных интересов:* контроль плотности газов с помощью эффузионных анализаторов с убывающим давлением истечения.

---

## Захаров Александр Юрьевич

Педагог дополнительного образования МАОУ СОШ № 22, г. Тамбов.

03 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Структурно-параметрический синтез физических моделей изолирующих дыхательных аппаратов для тренажерных комплексов виртуальной/дополненной реальности» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии).

Научный руководитель – д-р техн. наук, С. Ю. Алексеев.

Работа выполнена на кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

*Область научных интересов:* методы применения информационных технологий в технологических процессах изготовления конструктивных единиц технических систем.

---

## **Зеленцова Вероника Александровна**

Исполняющий обязанности заведующего кафедрой естественно-математических дисциплин ГАУ КО ДПО «Институт развития образования», г. Калининград.

22 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Хиральные анионные комплексы Со(III) как новые полифункциональные ингибиторы коррозии стали в средах с сульфатредуцирующими бактериями» на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Научный руководитель – д-р хим. наук, доцент Л. Г. Князева.

Работа выполнена в Институте живых систем ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» и Научно-образовательном центре «Безотходные и малоотходные технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ» – ФГБНУ «ВНИИТиН».

*Область научных интересов:* разработка новых полифункциональных ингибиторов коррозии стали в средах с сульфатредуцирующими бактериями.

---

## **Наимов Умеджон Розибекович**

Старший лаборант кафедры «Оптика и спектроскопия» Таджикского национального университета, г. Душанбе, Республика Таджикистан.

21 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Информационно-измерительная система оценивания координат и параметров движения беспилотных летательных аппаратов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор С. Н. Данилов.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

*Область научных интересов:* оптимизация алгоритмов определения координат и параметров движения интенсивно маневрирующих беспилотных летательных аппаратов информационно-измерительной системы радиолокатора на основе методов синтеза систем в пространстве состояний.

---

## **Печенкин Денис Владимирович**

Оператор технологических установок ООО «Газпром переработка», г. Астрахань.

15 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Управление технологическим процессом получения серы методом Клауса на основе оценки рисков развития аварийных ситуаций» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент И. А. Щербатов.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

*Область научных интересов:* модели, методы и алгоритмы управления технологическим процессом получения элементарной серы методом Клауса.

---

### **Саиф Марван Номан Мохаммед**

Аспирант кафедры «Информационные процессы и управление» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

10 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Математическое моделирование и управление многосвязными динамическими объектами» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. Г. Матвейкин.

Работа выполнена на кафедре «Информационные процессы и управление» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

*Область научных интересов:* средства и методы управления в условиях многосвязной динамической системы.

---

### **Сурков Владимир Олегович**

Соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ».

03 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Оптимальные адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор А. В. Иванов.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

*Область научных интересов:* комплексирование и обработка информации в технических системах, навигация, наведение и управление подвижными объектами, системный анализ.

---

### **Чепурнова Александра Владимировна**

Инженер-программист АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова», г. Тула.

15 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Моделирование и управление технологическим процессом плавления в дуговой печи» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Б. С. Дмитриевский.

Работа выполнена на кафедре «Информационные процессы и управление» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

*Область научных интересов:* модели, методы и алгоритмы управления процессом плавления в дуговой печи переменного тока малой вместимости.

---

## Южно Александра Игоревна

Инженер-химик, МУП «Управление «Водоканал», г. Таганрог.

17 декабря 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система контроля дозирования хлорагента и содержания хлороформа в питьевой воде на станциях водоподготовки» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Н. К. Плуготаренко.

Работа выполнена на кафедре техносферной безопасности и химии ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

*Область научных интересов:* теоретические и информационные аспекты обеспечения качества питьевой воды с позиции оценки канцерогенного риска с применением интеллектуальных информационно-измерительных управляющих систем контроля.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**