ISSN 0136-5835 (Print) ISSN 2542-1409 (Online)

DOI: 10.17277/issn.0136-5835

ВЕСТНИК Тамбовского государственного технического университета TRANSACTIONS
of the Tambov
State
Technical
University

# 2025. Tom 31. $N^{o}$ 1.

Четырехъязычный 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 Издательский центр ТГТУ

#### Совет редакторов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета». Эл. почта: gatapova.nc@mail.tstu.ru

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

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

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

Подписано в печать 01.04.2025. Дата выхода в свет 18.04.2025. Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,20; уч.-изд. л. 17,40. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 012. Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835 (Print) ISSN 2542-1409 (Online) © ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025 © Коллектив авторов, 2025

Знак информационной продукции 16+

#### EDITORIAL BOARD

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

**Oleg Abonosimov**, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Tambov State Technical University **Gennady Abramov**, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Evangelos Tsotsas**, PhD, Otto-von-Guericke University, Magdeburg, Germany **Lyudmila Tsygankova**, Dr. Chem. Sci., Prof., Derzhavin Tambov State University

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

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

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

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

### СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы	6
<b>Селиванова 3. М., Скоморохов К. В.</b> Принятие решений в информационно-измерительной системе при контроле качества материалов в условиях неопределенности	6
<b>Попов О. Н., Майникова Н. Ф., Рогов И. В.</b> Численное исследование теплопереноса в системе двух тел от линейного источника тепла	16
<b>Носков С. И., Попов Е. С., Бутин А. А.</b> Группировка переменных в регрессионной комбинированной функции риска	25
<b>Мордасов</b> Д. М., Шерстеникин П. А., Харитонов Н. А., Панченко Е. Б. Повышение точности термоволюмометрического метода анализа веществ	34
<b>Попов В. Г., Майстренко Н. В., Сарафанникова К. С., Ермакова Л. Н.</b> Математическая модель процесса фармацевтической экспертизы рецептурных бланков № $148-1/y-88$ и № $107-1/y$	43
<b>Антонов Е. А., Данилов С. Н.</b> Исследование чувствительности и точности следящего фильтра с моделью на основе звена второго порядка	51
Фролов С. В., Фролова Т. А., Лычагина В. О., Судаков Д. Е. Исследование динамических режимов биотехнической системы для выращивания растений	59
временных пропусков на территорию высших учебных заведений	70
тем подготовки операторов аэрогеофизической приборной продукции	81
ния направления вращения инкрементного энкодера на базе прерываний при наличии проблемы дребезга контактов	91
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	102
<b>Кошелева М. К.</b> Массопроводность при экстрагировании технологических загрязнений из волокнистых материалов	102
<b>Еськов В. А., Пахомов А. Н.</b> Особенности измерения веса в процессе сушки регенеративного продукта в вакууме	111
<b>Лазарев Д. С., Хорохорина И. В.</b> Кинетические характеристики электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств от ионов $Zn^{2+}$ , $Ni^{2+}$ , $Cu^{2+}$ , $Co^{2+}$	118
<b>Черникова О. В., Рухов А. В., Образцова Е. Ю., Павлинов Р. Ю.</b> Кинетика адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С	129
Черникова О. В., Рухов А. В., Образцова Е. Ю., Павлинов Р. Ю. Кинетика адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С Балыбин Д. В., Бернацкий П. Н., Тютюнник В. М., Мещерякова А. А. Зависимость лимитирующей стадии реакции выделения водорода из кислых хлоридных растворов на железе от концентрации добавки и природы растворителя	
Черникова О. В., Рухов А. В., Образцова Е. Ю., Павлинов Р. Ю. Кинетика адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С Бальбин Д. В., Бернацкий П. Н., Тютюнник В. М., Мещерякова А. А. Зависимость лимитирующей стадии реакции выделения водорода из кислых хлоридных	
Черникова О. В., Рухов А. В., Образцова Е. Ю., Павлинов Р. Ю. Кинетика адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С Балыбин Д. В., Бернацкий П. Н., Тютюнник В. М., Мещерякова А. А. Зависимость лимитирующей стадии реакции выделения водорода из кислых хлоридных растворов на железе от концентрации добавки и природы растворителя	138
Черникова О. В., Рухов А. В., Образцова Е. Ю., Павлинов Р. Ю. Кинетика адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С Бальбин Д. В., Бернацкий П. Н., Тютюнник В. М., Мещерякова А. А. Зависимость лимитирующей стадии реакции выделения водорода из кислых хлоридных растворов на железе от концентрации добавки и природы растворителя	138 144

### **CONTENTS**

Automation. Information Technology.  Control. Instruments 6
<b>Selivanova Z. M., Skomorokhov K. V.</b> Decision Making in the Data-Measuring System for Materials Quality Control under Uncertainty
<b>Popov O. N., Mainikova N. F., Rogov I. V.</b> A Numerical Study of Heat Transfer in a Two-Body System from a Linear Heat Source
<b>Noskov S. I., Popov E. S., Butin A. A.</b> Grouping of Variables in the Regression Combined Risk Function
Mordasov D. M., Sherstenikin P. A., Kharitonov N. A., Panchenko E. B. Improving the Accuracy of the Thermovolumometric Method of Substance Analysis
Popov V. G., Maistrenko N. V., Sarafannikova K. S., Ermakova L. N. A MathematicalModel of the Process of Pharmaceutical Expertise of Prescription Forms No. 148-1/y-88and No. 107-1/y43
Antonov E. A., Danilov S. N. A Study of Sensitivity and Accuracy of Tracking Filter with Second-order Link Model
<b>Frolov S. V., Frolova T. A., Lychagina V. O., Sudakov D. E.</b> Research on Dynamic Modes of Biotechnical System for Growing Plants
<b>Kalinina Yu. Yu., Smirnova Yu. A., Demina R. Yu.</b> A Method and Algorithm of Intelligent Decision-Making Support System for Generation of Temporary Access Passes to the Territory of Higher Educational Institutions
<b>Rusina A. A., Semenova E. G., Balashov V. M.</b> Information Support of Training Systems for Operators of Aerogeophysical Instrument Products
<b>Ponomarev A. A, Solovjev D. S., Solovjeva I. A.</b> Development of a System for Determining the Direction of Incremental Encoder Rotation Based on Interrupts in Case of Contact Bounce
Chemical Engineering and Related Industries.  Chemistry
<b>Kosheleva M. K.</b> Mass Conductivity during Extraction of Technological Contaminants from Fibrous Materials
<b>Eskov V. A., Pakhomov A. N.</b> Features of Weight Measurement during the Process of Drying a Regenerative Product in Vacuum
of Drying a Regenerative Product in Vacuum
<b>Lazarev D. S., Khorokhorina I. V.</b> Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> ,
Lazarev D. S., Khorokhorina I. V. Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>
Lazarev D. S., Khorokhorina I. V. Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>
Lazarev D. S., Khorokhorina I. V. Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>
Lazarev D. S., Khorokhorina I. V. Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>

# Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

УДК 681.5.08

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.006-015

### ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### 3. М. Селиванова⊠, К. В. Скоморохов

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», selivanova zm@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** инновационные технологии; информационная модель; контроль качества материалов; принятие решений; теплофизические свойства; условия неопределенности; экологические строительные материалы.

Аннотация: Предложен научный подход, содержащий этапы разработки информационно-измерительной системы и принятия решений в процессе определения теплофизических свойств экологических строительных материалов в условиях неопределенности; в информационной модели учтены множества входных и выходных сигналов системы, диапазоны теплопроводности исследуемых материалов, влияющие факторы, информация базы знаний и др. Разработана структура информационных каналов передачи информации при принятии решений в информационно-измерительной системе на основе базы знаний и цифрового канала обработки измерительной информации для повышения точности контроля качества материалов при неопределенных условиях.

#### Введение

При строительстве жилых и производственных помещений, объектов агропромышленного комплекса необходимо применение экологических строительных материалов (ЭСМ). В настоящее время в различных отраслях строительной индустрии находят применение инновационные технологии при разработке новых экологических строительных материалов и проектировании измерительных средств [1, 2]. Повышение экологического уровня применяемых строительных материалов обеспечивает комфортную безопасную среду зданий и минимальное экологическое воздействие на окружающую среду, то есть устойчивое строительное производство. При экологическом мониторинге качества строительных материалов выполняется контроль, как в процессе производства продукции, так и на заключительной стадии, когда определяется годная или дефектная продукция.

Однако существует проблема достоверного экологического мониторинга параметров качества используемых материалов при влиянии дестабилизирующих факторов. Теплофизические измерения характеризуются сложной процедурой, поэтому достаточно проблематично получить достоверную измерительную информацию в широком диапазоне теплопроводности строительных материалов. Для неразрушающего контроля одного из основных параметров строительных материалов – коэффициента теплопроводности, следует применить информаци-

онно-измерительную систему (**ИИС**). Известны измерительные информационные системы, выполняющие контроль теплофизических свойств материалов (**ТФС**), но данные измерительные средства характеризуются невысокой точностью измерений [3].

Для контроля ТФС объектов исследования также широко применяются измерительные средства, не отвечающие предъявляемым требованиям оперативности и точности результатов измерений, влиянию дестабилизирующих факторов (ДФ). Актуальным и важным является решение задачи обеспечения точности определения теплофизических свойств используемых материалов. Необходимо улучшить технические и метрологические характеристики измерительных средств, разрабатывая информационно-измерительные системы с использованием информационной среды их функционирования. Расширение функциональных возможностей ИИС основывается на применении современных структурных компонентов в ее составе: блока принятия решений (БПР) в нечеткой среде, который использует для определения ТФС экологических строительных материалов базу знаний и результаты классификации ЭСМ.

*Цель исследования* — повышение точности определения теплопроводности экологических строительных материалов в результате формирования реконфигурируемой структуры ИИС при реализации теплофизического измерения теплопроводности исследуемых экологических строительных материалов в идентифицированном диапазоне теплопроводности.

#### Научный подход, включающий этапы создания информационно-измерительной системы теплопроводности экологических строительных материалов

Разработка ИИС и ее информационной модели выполняется в результате применяемых гипотез, предположений и информационных технологий. Проектирование ИИС неразрушающего контроля ТФС различных видов экологических строительных материалов (дерева, красного и силикатного кирпича) выполнено на основе научного подхода, включающего нижеперечисленные этапы:

- определяются априорные данные о материалах, которые подлежат исследованию  $(\mathrm{ИM})_1,\dots,(\mathrm{ИM})_N$ , где N количество материалов. При классификации рассматриваются экологические материалы, применяемые для строительства жилых и промышленных зданий. Разрабатывается математическая модель для определенного класса материалов в соответствии с их теплопроводностью. Определяется множество контролируемых параметров  $U_{\Pi}$  согласно требованиям пользователей ИИС при контроле теплофизических свойств экологических материалов с учетом априорной информации об ИМ, уровней достоверности исходных данных, диапазонов контролируемых параметров материалов;
- создается ряд требований к входным информационным данным. Предварительно выполняются тестовые теплофизические измерения с использованием измерительного зонда (ИЗ) и системы измерительных преобразователей (СИП). Полученная измерительная информация корректируется при влиянии множества дестабилизирующих факторов  $V_{\text{Д}\Phi}$ ;
- выполняется идентификация информационных данных об ИИС. Диапазоны и уровни сигналов на входе системы при влиянии ДФ определяются множеством  $I_{\text{вх}Д\Phi}$ . Множество  $I_{\text{вых}Д\Phi}$  отображает выходные сигналы микроконтроллера (МК). Сигналы «Пуск»  $I_{\Pi}$  и сигналы управления  $I_{\text{упр}}$  с выхода микроконтроллера (МК) $_{\text{у}}$  подключают (МК) $_{\text{l}}$ ,...,(МК) $_{j}$  для контроля теплофизических свойств экологических материалов соответствующей предметной области (ПО) $_{\text{l}}$ ,...,(ПО) $_{j}$ ;

- для функционирования ИИС выбираются микроконтроллеры, которые соответствуют необходимым информационным данным: среднему времени передачи информационных сигналов  $t_{\rm cp}$  и обработки информации  $t_{\rm OU}$ , которая передается информационному каналу, представленному множеством  $I_{\rm MK}$ , объему памяти микроконтроллеров (ПМК);
- в созданном информационном канале пользователя формируются сведения о применяемых экологических строительных материалах и диапазонах их теплопроводности, режимных параметрах для проведения теплофизических измерений, влияющих внешних и внутренних факторах, структурном построении ИИС теплофизических свойств объектов исследования;
- в базу знаний (**Б3**) записываются априорные данные экспертов  $I_{\rm HS}$  и пользователей  $I_{\rm HII}$  для различных предметных областей, а также экспериментальная  $I_{\rm экс}$  и априорная информация  $I_{\rm anp}$  при контроле качества объектов ИИС [4];
- в базу знаний заносится множество информации  $I_{\rm B3}$ , сформированной в информационных каналах: информационные данные, поступающие с персонального компьютера (ПК)  $I_{\rm TIK}$  и информация, представленная экспертами  $I_{\rm 9K}$ ; априорная  $I_{\rm anp}$ , экспериментальная  $I_{\rm 3KC}$ , текущая  $I_{\rm TEK}$ , измерительная от объекта измерений (ОИ)  $I_{\rm OH}$ , используемая в моделях  $I_{\rm MOJ}$ , методах  $I_{\rm MET}$  и алгоритмах  $I_{\rm AII}$  работы ИИС при проведении теплофизических измерений;
- в блоке усилителя (**БУ**) формируются коэффициенты усилений для определенных диапазонов  $K_{\rm J}$  и информация  $I_{\rm EV}$ , поступающая с ИЗ  $I_{\rm H3}$ . С блока тепловых воздействий (**БТВ**) подаются тепловые импульсы в соответствии с предметной области объекта  $I_{\rm EMK\ IIO}$  на исследуемые материалы  $I_{\rm ETB}$ , затем информационный сигнал отклика после нагрева материала поступает в блок микроконтроллеров (**БМК**). Множество информационных сигналов  $I_{\rm IIP}$  формируется в блоке принятия решений (**ПР**);
- создается информационная среда функционирования структурных компонентов, входящих в ИИС контроля ТФС ИМ, представленной множеством  $I_{\rm ИИС}$  [5];
- с использованием предложенного множества критериев оценки экономической эффективности ИИС  $\Theta_{\text{ИИС}}$ :  $P_{\text{T}}$  потери точности,  $P_{\text{ОП}}$  потери оперативности,  $\delta$  погрешность контроля ТФС объектов, оценивается техническая эффективность ИИС для определения ТФС экологических строительных материалов.

#### Информационная модель для поддержки принятия решений в ИИС

На основе вышепредставленной информации разработана информационная модель информационно-измерительной системы  $M_{\rm UUC}$ , которая применяется при контроле  $\rm T\Phi C$  объектов, приведенная в виде следующего кортежа множеств:

$$\begin{aligned} & \pmb{M}_{\text{ИИС}} = < \pmb{I}_{\text{ИМ}}^d, \pmb{U}_{\Pi}, \pmb{V}_{\text{Д}\Phi}, \pmb{I}_{\text{ВХ Д}\Phi}, \pmb{I}_{\text{ВЫХ Д}\Phi}, \pmb{I}_{\text{ИК}}, \pmb{I}_{\text{ИП}}, \pmb{I}_{\text{ИЭ}}, \pmb{I}_{\text{БЗ}}, \pmb{I}_{\text{БПР}}, \pmb{I}_{\text{ИИС}}, \ni_{\text{ИИС}}>, \end{aligned}$$
 в который включен ряд множеств: 
$$\pmb{I}_{\text{ИМ}}^d = \left\{ \!\! I_i^{dj}, i=1, \ldots, N, d_j, j=1, \ldots, p \right\} - \text{выход-}$$
 ные сигналы с ИМ,  $d$  — диапазон теплопроводности ИМ,  $p$  — число диапазонов; 
$$\pmb{U}_{\Pi} = \left\{ \!\! U_i, i=1, \ldots, m \right\} - \text{определяемые параметры теплофизических свойств материалов, } m$$
 — число параметров; 
$$\pmb{V}_{\text{Д}\Phi} = \left\{ \!\! V_{R_{\text{T}}}, V_W, V_{\psi}, V_T \right\} - \text{влияющие факторы} \end{aligned}$$

в процессе измерений:  $V_{R_{\mathrm{T}}}$  — термосопротивление в контактной области измерительного зонда и объекта;  $V_W$  — влажность;  $V_{\Psi}$  — шероховатость поверхности объекта;  $V_T$  — значения температуры;  $I_{\mathrm{BX}} \mathrm{Д} \Phi = \left\{ I_{\mathrm{BX}}^{di} , i=1,...,x \right\}$  — множество входных сигналов с учетом воздействующих факторов, x — число сигналов на входе;  $I_{\mathrm{BMX}} \mathrm{Д} \Phi = \left\{ I_{\mathrm{BMX}}^{di} , i=1,...,\gamma \right\}$  — множество сигналов на выходе при учете влияющих факторов,  $\gamma$  — число выходных сигналов;  $I_{\mathrm{HK}} = \{I_{\mathrm{IMK}}, t_{\mathrm{III}}, t_{\mathrm{OH}}\}$  — параметры информационных каналов ( $\mathbf{HK}$ ),  $t_{\mathrm{III}}$  — время передачи информации;  $I_{\mathrm{III}} = \{I_{\mathrm{IIII}}, i=1,....,l\}$  — информация от пользователя;  $I_{\mathrm{HO}} = \{I_{\mathrm{IMI}}, i=1,....,b\}$  — информация от эксперта;  $I_{\mathrm{E3}} = \{I_{\mathrm{IK}}, I_{\mathrm{3K}}, I_{\mathrm{anp}}, I_{\mathrm{3KC}}, I_{\mathrm{TeK}}, I_{\mathrm{MOT}}, I_{\mathrm{an}}\}$  — информация из базы знаний;  $I_{\mathrm{EIIP}} = \{I_{\mathrm{EV}}, I_{\mathrm{H3}}, I_{\mathrm{ETB}}, I_{\mathrm{EMK}}\}$  — информация, поступающая из БПР;  $I_{\mathrm{IMC}} = \{I_{\mathrm{IMC}}, i=1,...,y\}$  — структуры ИИС;  $\Theta_{\mathrm{IMC}} = \{P_{\mathrm{T}}, P_{\mathrm{OII}}, \delta\}$  — критерии, оценивающие техническую эффективность ИИС для контроля ТФС экологических строительных материалов.

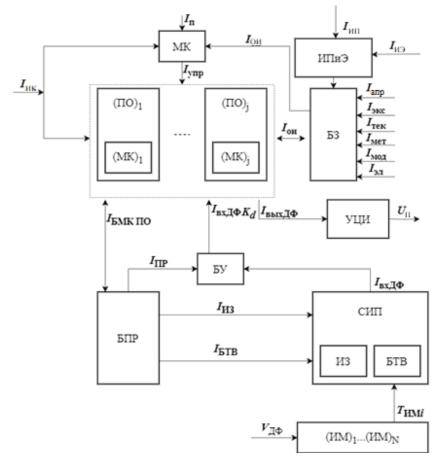


Рис. 1. Структура информационных каналов передачи информации в ИИС: ИП и ИЭ – информационные данные пользователей и экспертов; УЦИ – устройство для цифровой индикации контролируемых параметров

Структурная схема, показанная на рис. 1, отражает процедуру реализации информационной модели, что позволяет принимать решения в ИИС, контролирующей теплопроводность экологических строительных материалов. На схеме представлены сформированные информационные каналы получения, преобразования и передачи информации, обмена информацией между основными структурными компонентами ИИС.

Для контроля и оценки качества используемых в строительном производстве экологических материалов осуществляется инновационное проектирование информационно-измерительной системы для неразрушающего контроля теплопроводности экологических материалов.

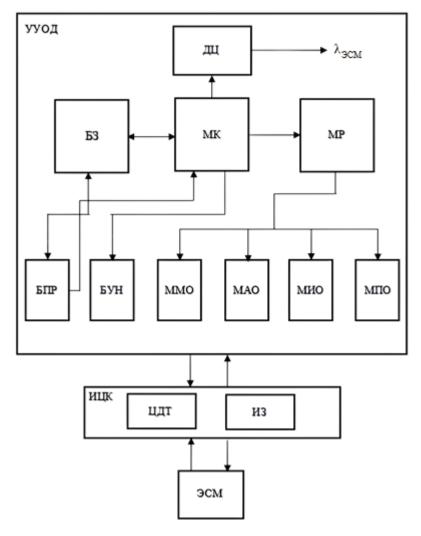


Рис. 2. Структурная схема ИИС теплопроводности экологических строительных материалов:

УУОД – устройство управления и обработки данных; ДЦ – дисплей цифровой; МР – модуль реконфигурирования; БПР – блок принятия решений; БУН – блок управления нагревом; ММО – модуль метрологического обеспечения; МАО – модуль аналитического обеспечения; МПО – модуль информационного обеспечения; МПО – модуль программного обеспечения; ИЦК – измерительный цифровой канал; ЦДТ – цифровые датчики температуры; ИЗ – измерительный зонд

Архитектура ИИС отличается от известных следующим: адаптацией к различным измерительным ситуациям на основе реконфигурирования структурных компонентов ИИС для обеспечения достоверности получаемых измерительных данных, цифровыми инновационными технологиями при обработке информации в измерительном канале, применением адаптивного алгоритма функционирования ИИС. Структура информационных каналов передачи информации в информационно-измерительной системе теплопроводности экологических строительных материалов  $\lambda_{\rm 3CM}$  представлена на рис. 2 [6 – 9].

Информационно-измерительная система теплопроводности строительных экологических материалов реализует функционирование в соответствии с программным обеспечением и соответствующим методом теплофизического измерения, в котором с использованием ИЗ выполняется нагрев исследуемого материала.

Цифровые датчики температуры контролируют температуру в контактной области зонда и материала, а затем измерительную информацию передают по цифровому каналу в микроконтроллер для обработки полученных данных и расчета теплопроводности ЭСМ. С использованием информационных данных в базе знаний ИИС в блоке принятия решений реализуется процедура выбора требуемых параметров для каждого режима теплофизических измерений согласно теплопроводности ЭСМ. При этом выполняется реконфигурация структуры ИИС с использованием разработанного аналитического, программного и метрологического обеспечений.

#### Определение теплопроводности экологических строительных материалов

Теплопроводность материала оценивается коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , Br/(м·K), который определяется по формуле [10, 11]

$$\lambda = \frac{Ql}{S(T_2 - T_1)\tau},$$

где Q — тепло, передаваемое материалу, Дж; l — толщина материала, м; S — площадь поверхности контроля, м $^2$ ;  $(T_2-T_1)$  — разность температуры в результате теплового воздействия на объект,  $^{\circ}$ С;  $\tau$  — время, с.

На основе экспериментальных исследований установлены зависимости коэффициента теплопроводности ЭСМ с учетом воздействия основного влияющего

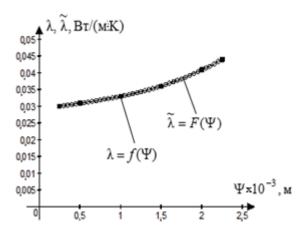


Рис. 3. Зависимость теплопроводности пенопласта от шероховатости его поверхности

фактора — шероховатости материала  $\Psi$ , которые сохранены в базе знаний ИИС и применяются для коррекции результатов измерения. На рисунке 3 приведены зависимости  $\lambda = f(\Psi)$  и аппроксимирующая  $\widetilde{\lambda} = f(\Psi)$  для строительного материала — пенопласта.

Аппроксимирующая зависимость  $\widetilde{\lambda} = f(\Psi)$  для пенопласта представлена в следующем виде:

$$\tilde{\lambda} = F(\Psi) = 8.88 \cdot 10^{-4} \Psi^3 - 6.58 \cdot 10^{-4} \Psi^2 + 0.0036 \Psi + 0.029.$$

# Экспериментальные исследования экологических строительных материалов с использованием ИИС

Выполнены экспериментальные исследования ИИС теплопроводности экологических строительных материалов в условиях неопределенности при влиянии внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Определена относительная погрешность при измерении теплопроводности материалов, равная  $4-6\,\%$ . Рассчитанные значения относительной погрешности измерения коэффициента теплопроводности исследуемых материалов представлены в табл. 1.

Метрологический анализ расчетных данных погрешности теплофизических измерений подтверждает результат исследования — повышение точности определения коэффициента теплопроводности экологических строительных материалов.

#### Заключение

Множества данных информационной модели и базы знаний используются в информационно-измерительной системе при контроле теплофизических свойств экологических материалов, которые применяются при строительстве зданий, объектов агропромышленного комплекса и предприятий различных отраслей производства.

Реализован научный подход, включающий этапы создания реконфигурируемой структуры ИИС, которая отличается наличием дополнительных функциональных возможностей при определении ТФС экологических материалов в различных диапазонах теплопроводности в результате адаптации к предметной области объекта исследования.

Таблица 1 Данные расчета относительной погрешности определения теплопроводности экологических строительных материалов

Экологические	λ <sub>ЭСМ</sub> , ]	Расчетная	
строительные материалы	справочная	измеренная	погрешность измерения $\delta_{\lambda}$ , %
Пенопласт	0,36	0,38	5,56
Металлочерепица	0,17	0,18	5,88
Керамическая черепица	0,25	0,26	4,00
Красный кирпич	15,82	14,92	5,69
Силикатный кирпич	1,35	1,42	5,19
Древесина	0,24	0,25	4,17

Инновационные технологии, применяемые в ИИС при принятии решений в условиях неопределенности на основе использования базы знаний, цифровых и информационных технологий, способствуют повышению точности контроля качества строительных материалов. Информационно-измерительная система с реконфигурируемой структурой рекомендуется для применения на предприятиях при контроле качества выпускаемых экологических строительных материалов.

#### Список литературы

- 1. Слесарев, М. Ю. Инновационные методы формирования систем экологической безопасности строительства / М. Ю. Слесарев // Вестник МГСУ. -2007. № 3.- С. 7-12.
- 2. Селиванова, З. М. Интеллектуальная информационно-измерительная система дистанционного контроля качественных параметров теплоизоляционных материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Д. С. Куренков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 6 19. doi: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019
- 3. Hofman, D. Intellectual Measurements for Obtaining Objective Information in Science and Technology / D. Hofman, K. Karaya // Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO. Prague, 1985. P. 19 34.
- 4. Селиванова, З. М. Информационная и математические модели для прогнозирования надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, К. В. Скоморохов // Надежность и качество сложных систем. − 2022. − № 2(38). − С. 61 − 69. doi: 10.21685/2307-4205-2022-2-7
- 5. Селиванова, 3. М. Оперативный неразрушающий контроль теплопроводности материалов в строительной промышленности / 3. М. Селиванова, К. В. Скоморохов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. -2022. -№ 3. -C. 85-92.
- 6. Селиванова, З. М. Информационно-измерительная система теплофизических свойств твердых материалов с интеллектуальным датчиком реконфигурируемой структуры / З. М. Селиванова, В. С. Ерышова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2019. N oldot 5(128). C. 4 19.
- 7. Intelligent Information-Measuring System for Operational Control of Thermo-Physical Properties of Heat Insulating Materials // Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov, O. V. Trapeznikova, I. V. Nagornova // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1546(1). P. 012029.
- 8. Селиванова, 3. М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов: монография / 3. М. Селиванова. М.: Машиностроение-1, 2006. 207 с.
- 9. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. СПб. : Питер, 2001. 384 с.
- 10. Вавилов, В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля : справочник / В. П. Вавилов. М. : Машиностроение, 1991. 240 с.
- 11. Лыков, А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие / А. В. Лыков. М. : Высш. школа, 1967. 600 с.

# **Decision Making in the Data-Measuring System for Materials Quality Control under Uncertainty**

### Z. M. Selivanova<sup>⊠</sup>, K. V. Skomorokhov

Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems, selivanova zm@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** innovative technologies; information model; materials quality control; decision making; thermophysical properties; uncertainty conditions; environmentally friendly building materials.

**Abstract:** The paper proposes a scientific approach that contains stages of developing a data-measuring system and making decision in the process of determining the thermophysical properties of environmentally friendly building materials under uncertainty. The information model takes into account the set of input and output signals of the system, the ranges of thermal conductivity of the materials under study, influencing factors, knowledge base information, etc. The structure of information channels for transmitting information when making decisions in the data-measuring system based on the knowledge base and the digital channel for processing measuring information has been developed to improve the accuracy of quality control of materials under uncertain conditions.

#### References

- 1. Slesarev M.Yu. [Innovative methods of forming ecological safety systems for construction], *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2007, no. 3, pp. 7-12. (In Russ., abstract in Eng.)
- 2. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S. [Intelligent information and measuring system for remote monitoring of quality parameters of thermal insulation materials under the influence of destabilizing factors], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 6-19. doi: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019 (In Russ., abstract in Eng.)
- 3. Hofman D., Karaya K. Intellectual Measurements for Obtaining Objective Information in Science and Technology, *Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO*, Prague, 1985, pp. 19-34.
- 4. Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. [Information and mathematical models for predicting the reliability of an intelligent information and measuring system for thermophysical properties of materials], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2022, no. 2(38), pp. 61-69. doi: 10.21685/2307-4205-2022-2-7 (In Russ., abstract in Eng.)
- 5. Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. [Operational non-destructive testing of thermal conductivity of materials in the construction industry], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* [Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev], 2022, no. 3, pp. 85-92. (In Russ., abstract in Eng.)
- 6. Selivanova Z.M., Yeryshova V.S. [Information and measuring system of thermophysical properties of solid materials with an intelligent sensor of reconfigurable structure], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroyeniye* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering], 2019, no. 5(128), pp. 4-19. (In Russ., abstract in Eng.)

- 7. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Trapeznikova O.V., Nagornova I.V. Intelligent Information-Measuring System for Operational Control of Thermo-Physical Properties of Heat Insulating Materials, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1546(1), art. 012029.
- 8. Selivanova Z.M. *Intellektualizatsiya informatsionno-izmeritel'nykh sistem nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv tverdykh materialov: monografiya* [Intellectualization of information-measuring systems for non-destructive testing of thermophysical properties of solid materials: monograph], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2006, 207 p. (In Russ.)
- 9. Gavrilova T.A., Khoroshevskiy V.F. *Bazy znaniy intellektual'nykh sistem* [Knowledge bases of intelligent systems], St. Petersburg: Piter, 2001, 384 p. (In Russ.)
- 10. Vavilov V.P. *Teplovyye metody nerazrushayushchego kontrolya: spravochnik* [Thermal methods of non-destructive testing: reference book], Moscow: Mashinostroyeniye, 1991, 240 p. (In Russ.)
- 11. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti: ucheb. posobiye* [Theory of heat conductivity: textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.)

# Entscheidungsfindung im Informations- und Messsystem bei der Materialqualitätskontrolle unter Unsicherheitsbedingungen

**Zusammenfassung:** Es ist ein wissenschaftlicher Ansatz vorgeschlagen, der Phasen der Entwicklung eines Informations- und Messystems sowie der Entscheidungsfindung im Prozess der Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften umweltfreundlicher Baumaterialien unter Unsicherheitsbedingungen umfasst; das Informationsmodell berücksichtigt Eingabesätze und Ausgangssignale des Systems, Wärmeleitfähigkeitsbereiche der untersuchten Materialien, Einflussfaktoren, Informationen aus der Wissensbasis usw. Die Struktur der Informationskanäle zur Informationsübertragung bei Entscheidungen im Informations- und Messsystem auf Grundlage der Wissensbasis und der digitale Kanal zur Verarbeitung von Messinformationen sind entwickelt, um die Genauigkeit der Qualitätskontrolle von Materialien unter unsicheren Bedingungen zu verbessern.

### Prise des décision dans le système d'information et de mesure pour le contrôle de la qualité des matériaux dans les conditions de l'incertitude

**Résumé:** Est proposée une approche scientifique comprenant les étapes du développement d'un système d'information et de mesure et de la prise des décision dans le processus de détermination des propriétés thermophysiques des matériaux de construction environnementaux dans des conditions d'incertitude; le modèle d'information prend en compte de nombreuses entrées la structure des canaux d'information pour la transmission de l'information lors de l'adoption des solutions dans le système d'information et de mesure à la base des connaissances et du canal numérique pour le traitement de l'information de mesure afin d'améliorer la précision du contrôle de la qualité des matériaux dans des conditions incertaines.

**Авторы:** *Селиванова Зоя Михайловна* — доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Скоморохов Кирилл Викторович* — аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.016-024

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ ДВУХ ТЕЛ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

### О. Н. Попов⊠, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов

Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», popov oleeg@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова и фразы: линейный источник тепла; математическая модель; система двух тел; теплоперенос; теплофизические свойства; численное исследование.

Аннотация: Представлены результаты численного исследования теплопереноса при зондовом неразрушающем контроле теплофизических свойств объектов из твердых материалов, подвергающихся тепловому воздействию с постоянной подачей мощности от линейного нагревателя в виде полосы. Рассмотрена возможность применения базовой математической модели для определения теплопроводности твердых материалов без введения поправок. Для решения вопросов градуировки измерительного устройства, реализующего рассматриваемый метод, использован регрессионный анализ.

#### Обозначения

α, β – постоянные измерительного уст-H – ширина, м; ройства; l – длина, м;  $\epsilon$  – тепловая активность,  $\mathrm{Br} \cdot \mathrm{c}^{0.5} / (\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K})$ :  $\overline{q}_0$  – плотность теплового потока,  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $BT/(M^2)$ ;  $\lambda$  – теплопроводность, BT/(м·K); T – температура, °С.  $\tau$  – время, c; у – число Эйлера. Индексы a – температуропроводность,  $M^2/c$ ; 1 – исследуемое тело;  $b_0$ ,  $b_1$  – коэффициенты модели; 2 – подложка измерительного зонда; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); о – образцовая мера; d – толщина, м; расч – расчетное значение. h – половина ширины полосы, м;

#### Введение

При теплофизических измерениях широко используют систему из двух тел, которая нагревается линейным источником тепла в виде узкой полосы, как с импульсной, так и с постоянной подачей мощности [1-3].

Локальные импульсные тепловые воздействия по свободной поверхности объекта исследования достаточно часто применяют при неразрушающем контроле (НК) теплофизических свойств (ТФС) вследствие достаточно простых реализаций в опыте [2].

Применение сложных алгоритмов теплового импульсного воздействия нежелательно при исследовании объектов из полимерных материалов (ПМ) со сложной молекулярной структурой из-за влияния фазовых и релаксационных переходов на результат измерения. Полимерные материалы характеризуются сравнительно низкой теплопроводностью ( $\lambda < 0.5 \text{ Bt/(M·K)}$ ) [4].

Применение линейного источника тепла с постоянной подачей мощности в методах НК ТФС с учетом влияния структурных переходов в объектах из полимерных материалов рассматривается в работе [5]. Измерительный зонд (ИЗ) в данном методе оснащен линейным нагревателем в виде цилиндрической нити [5]. Учитывая сложность изготовления полуцилиндрических пазов в теле подложки ИЗ и в плоскости контакта объекта исследования, часто прибегают к «раскатыванию» нити в полосу.

В данной работе использована модель нестационарного теплопереноса от бесконечного линейного нагревателя в виде узкой полосы, расположенного в контактной поверхности подложки ИЗ [3]. Аналитическое решение, представленное в работе [5], позволяет определить границы стадии регуляризации тепловых потоков и реализовать на практике НК ТФС [6].

#### Описание метола НК

Рассматривается контактный теплоперенос в системе двух тел, реализующий метод неразрушающего определения ТФС. Схема тепловой системы представлена на рис. 1. В ходе эксперимента термоприемник (**ТП**) регистрирует термограмму (зависимость значений температуры от времени) на центральной линии нагревателя (ось Z) [6]. Практическая реализация метода НК ТФС предусматривает выделение на экспериментальной термограмме рабочего участка, соответствующего режиму локальной регуляризации тепловых потоков [3].

Расчетное соотношение для определения ТФС [7]

$$T(0, 0, \tau) = \frac{\overline{q_0}h}{\lambda \pi} \left\{ \ln(4a\tau) - \ln h^2 + 2 - \gamma \right\}. \tag{1}$$

Ряд величин определяется режимными ( $\overline{q}_0$ ,  $\tau$ ) и конструктивными (h) особенностями применяемого ИЗ.

Уравнение (1) в виде линейной зависимости имеет вид

$$T(t_{\scriptscriptstyle \Pi}) = b_{\scriptscriptstyle \parallel} t_{\scriptscriptstyle \Pi} + b_0 , \qquad (2)$$

где  $t_{\pi} = \ln[\tau]$ .

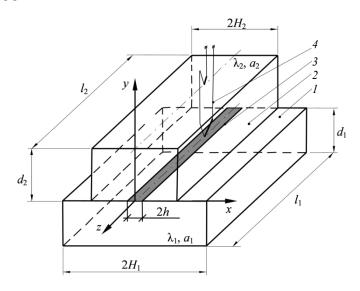


Рис. 1. Тепловая система:

I – тело 1 (исследуемый объект); 2 – тело 2 (подложка измерительного зонда); 3 – нагреватель; 4 – термоэлектрический преобразователь

Выражения для расчета постоянных измерительного устройства и ТФС:

$$\alpha = \lambda_0 b_{10}; \tag{3}$$

$$\beta = \ln[a_0] - \frac{b_{00}}{b_{10}}; \tag{4}$$

$$\lambda = \alpha \left(\frac{1}{b_1}\right),\tag{5}$$

где  $b_1$  – коэффициент модели, который определяется непосредственно из экспериментальной термограммы;

$$a = \exp\left[\frac{b_0}{b_1} + \beta\right]. \tag{6}$$

#### Численное исследование теплопереноса

Математическая модель (1) - (6) не учитывает ряд факторов: потери теплоты в подложку ИЗ, термические сопротивления, перераспределение теплового потока на нагревателе и др. Данные факторы оказывают непосредственное влияние на результаты эксперимента.

Для определения теплопроводности материала тела 1 используем выражение (5), из которого следует, что теплопроводность прямопропорциональна комплексу  $1/b_1$ .

Для проведения исследования, целью которого является определение зависимости теплопроводности от соответствующего комплекса (на основании анализа различных функциональных зависимостей), в качестве объектов контроля выбран ряд твердых материалов (табл. 1).

На рисунке 2 представлена часть тепловой системы с учетом симметричности объекта относительно оси Y. Визуализация температурных полей в системе двух тел получена численным решением в программном пакете ELCUT [8]; тело 1 – объект исследования из полиэтилена высокой плотности марки П4020-Э ( $\lambda_1 = 0.5 \; \mathrm{Bt/(m\cdot K)}; \; c_1 = 2400 \; \mathrm{Дж/(kr\cdot K)}; \; \rho_1 = 938 \; \mathrm{kr/m^3}$ ); тело 2 – подложка ИЗ выполнена из полиуретана марки «Рипор» ( $\lambda_2 = 0.028 \; \mathrm{Bt/(m\cdot K)}; \; c_2 = 1270 \; \mathrm{Дж/(kr\cdot K)}; \; \rho_2 = 50 \; \mathrm{kr/m^3}$ ). При имитационном исследовании размеры  $H_1, H_2, d_1 d_2, h$  соответствовали размерам тела 1 и тела 2 (объекта и ИЗ), которые были использованы в реальном эксперименте [7]. Численное исследование выполнено для горизонтально расположенных контактных поверхностей тел 1 и 2.

Распределение температуры двух тел соответствует одномерным полуцилиндрическим полям от нагревателя с постоянной подачей мощности в системе (рис. 3).

Данные, полученные численным моделированием, позволили построить зависимость  $T=f(\ln[\tau])$ , по которой определены постоянные измерительного устройства ( $\alpha=3,3977,\ \beta=-14,5744$ ) (рис. 4). На зависимости  $T=f(\ln[\tau])$  определяется участок (рабочий), на котором обеспечивается совпадение с результатами экспериментов по математической модели (1) – (6). На рабочем участке реализуется тепловой режим, соответствующий стадии локальной регуляризации тепловых потоков [3].

Рабочий участок термограммы описывается уравнением

$$y = 6,7954x - 5,1321$$

где y = T;  $x = \ln[\tau]$ ; коэффициенты модели  $b_{00} = -5,1321$ ;  $b_{10} = 6,7954$ .

Таблица 1 **Теплофизические свойства материалов (справочные данные)** [4]

Наименование	λ, Βτ/(м·K)	ρ, κΓ/м <sup>3</sup>	с, Дж/(кг·К)	$\text{Bt} \cdot \text{c}^{0.5}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Полиуретан марки «Рипор»	0,028	50	1270	42,17
Полиметилметакрилат (ПММА)	0,195	258	1349	260,5
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	0,205	1315	990	516,6
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	0,270	2200	1050	789,75
Нейлон-6,6	0,364	986	1660	771,87
Полиэтилен низкой плотности (П2015-К)	0,420	3200	872	1082,57
Полиэтилен высокой плотности (П4020-Э)	0,500	938	2400	1060,94
Органическое стекло (ТФ)	0,674	2300	441,8	806,43
Фарфор	1,04	2400	1090	1649,44
Кварцевое стекло (КВ)	1,341	2224	728	1473,49

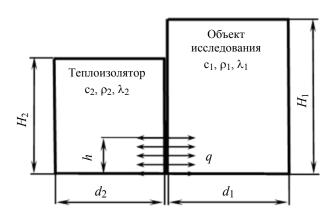


Рис. 2. Тепловая схема

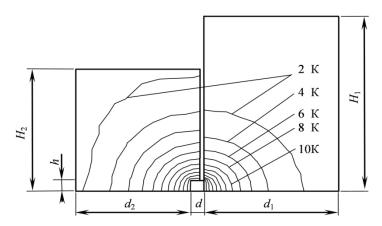
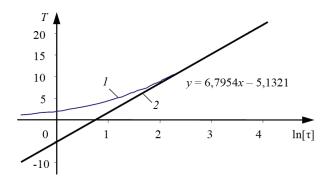


Рис. 3. Распределение температуры



**Рис. 4. Зависимость**  $T = f(\ln[\tau])$ : 1 -кривая, полученная численным моделированием; 2 -линия тренда

В целях повышения точности обработки данных с использованием системы аналитических вычислений Maple написана программа, которая позволила для каждого исследуемого материала (см. табл. 1), построить термограмму, выделить рабочий участок, рассчитать коэффициенты математической модели  $(b_0, b_1)$ , теплофизические свойства и статистические характеристики (доверительный интервал, стандартную ошибку). Результаты представлены в табл. 2. Значение  $\lambda_{\text{расч}}$  получено по выражению (7). Выделение рабочих участков на термограммах осуществляли, используя критерий Дарбина—Ватсона [9].

По результатам численного моделирования построена зависимость  $\lambda = f(1/b_1)$ , которая имеет практически линейный характер для ряда рассматриваемых в исследовании твердых неметаллических материалов в диапазоне теплопроводности  $\lambda = 0.02...1,3$  Вт/(м·К) (рис. 5). Для зависимости  $\lambda = f(1/b_1)$  выполнен регрессионный анализ, который позволил установить связь между факторами и результирующим показателем и получить показатели, представленные в табл. 3. Из данных следует, что коэффициент регрессии имеет значение, свидетельствующее о тесной связи теплопроводности с комплексом  $1/b_1$ , а коэффициент

Таблица 2 Результаты обработки данных имитационного исследования

Наименование	$b_0$	$b_1$	$\lambda_{\text{расч}}, \text{Bt/}(\text{м-K})$
Полиуретан марки «Рипор»	-203,034	75,588	0,045
ПММА	-38,858	22,644	0,15
ПЭТФ	-24,76	16,522	0,206
ПТФЭ	-15,113	11,77	0,289
Нейлон-6,6	-9,977	9,667	0,352
Полиэтилен низкой плотности (П2015-K)	-7,045	7,661	0,444
Полиэтилен высокой плотности (П4020-Э)	-5,132	6,795	0,5
Органическое стекло (ТФ)	-2,511	5,841	0,582
Фарфор	-0,105	3,235	1,05
Кварцевое стекло (КВ)	0,72	2,727	1,246

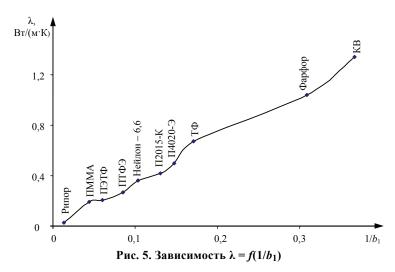


Таблица 3 Результат регрессионного анализа

	Коэффициент		
Материал	корреляционной зависимости	детерминации	
Твердые неметаллические материалы $\lambda = 0.021,3~\mathrm{Br/(m\cdot K)}$	0,995	0,99	
Полимерные материалы $\lambda = 0.020.5 \text{ Bt/(M·K)}$	0,989	0,979	

детерминации показывает, что достоверность исходных данных очень высокая, моделью можно пользоваться для прогноза значений теплопроводности.

На рисунке 6 представлены результаты оценки параметров уравнения регрессии. Точками на зависимостях отмечены полученные в процессе численного исследования значения теплопроводности, пунктиром — геометрическое место доверительных пределов (для уровня значимости 0,05) [9].

Некоторые отдельные экспериментальные точки выходят за 95%-ные доверительные пределы. Однако следует помнить, что доверительные пределы действительны для выборочных средних значений теплопроводности при заданном значении соответствующего комплекса ( $\lambda = f(1/b_1)$ ).

#### Заключение

Численное исследование метода показало, что при использовании линейного источника тепла с постоянной подачей мощности, расположенного в контактной поверхности подложки ИЗ (тело 2), в исследуемом объекте (тело 1) реализуется одномерное полуцилиндрическое поле.

Показана возможность использования базовой математической модели (1) – (6) для определения теплопроводности без введения поправок, которые бы учитывали потери теплоты в подложку ИЗ, термические сопротивления, перераспределение теплового потока на нагревателе и др.

Установлена возможность применения линейной зависимости при определении ТФС рассмотренных твердых неметаллических материалов.

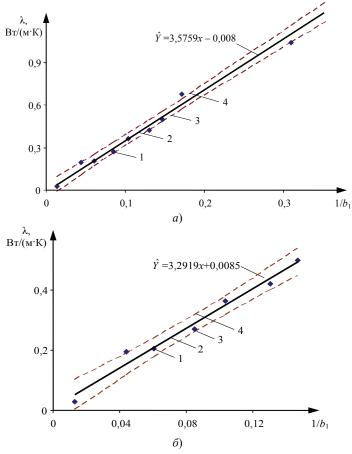


Рис. 6. Зависимости  $\lambda = f(1/b_1)$  для твердых неметаллических материалов (a) и ряда полимерных материалов, свойства которых представлены в табл. 1 (б): I — значение теплопроводности; 2 — оценка линии регрессии; 3, 4 — геометрическое место для точек соответственно нижних и верхних доверительных пределов

Результаты регрессионного анализа позволили рассмотреть вопросы градуировки средства измерения, реализующего рассматриваемый метод. Для градуировки прибора при использовании ПМ с  $\lambda$  < 0,5 BT/(м·K) необходимо два образца, а при использовании твердых неметаллических материалов с  $\lambda$  > 0,5 BT/(м·K) — достаточно одного.

#### Список литературы

- 1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев [и др.] ; под. ред. В. В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М. : Машиностроение, 2005.-656 с.
- 2. Чернышов, В. Н. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий: монография / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. СПб.: Экспертные решения, 2016. 384 с.
- 3. Жуков, Н. П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий: монография / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. М.: Машиностроение-1, 2004. 288 с.
- 4. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Профессия, 2005. 248 с.

- 5. Метод и измерительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н. Ф. Майникова, Д. Г. Бородавкин, И. В. Рогов, А. Н. Грибков. Тамбов :  $\Phi \Gamma EOV BO \ll T \Gamma T Y \gg$ , 2019. -84 с.
- 6. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С. В. Мищенко, Ю. Л. Муромцев, Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, О. Н. Попов. Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 112 с.
- 7. Теоретическое обоснование метода неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, О. Н. Попов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -2010.-T. 16, № 2.-C. 296 -302.
- 8. ELCUT: Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя / OOO «Тор». СПб. : Издательские решения, 2023. 290 с.
- 9. Химмельблау, Д. М. Анализ процессов статистическими методами / Д. М. Химмельблау; пер. с англ. В. Д. Скаржинского. М.: Мир, 1973. 960 с.

### A Numerical Study of Heat Transfer in a Two-Body System from a Linear Heat Source

O. N. Popov, N. F. Mainikova, I. V. Rogov

Department of Energy Supply of Enterprises and Heat Engineering, popov oleeg@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** linear heat source; mathematical model; two-body system; heat transfer; thermophysical properties; numerical study.

**Abstract:** The results of a numerical study of heat transfer during probe non-destructive testing of the thermophysical properties of objects made of solid materials exposed to heat with constant power supply from a linear heater in the form of a strip are presented. The possibility of using a basic mathematical model to determine the thermal conductivity of solid materials without introducing corrections is considered. Regression analysis was used to solve the calibration issues of the measuring device implementing the method in question.

#### References

- 1. Klyuyev V.V. (Ed.); Sosnin F.R., Kovalev A.V. [et al.], *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: spravochnik* [Non-destructive testing and diagnostics: a reference guide], Moscow: Mashinostroenie, 2005, 656 p. (In Russ.).
- 2. Chernyshov V.N., Chernyshova T.I. *Metody i informatsionno-izmeritel'nyye sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy: monografiya* [Methods and information-measuring systems for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products: monograph], St. Petersburg: Izdatel'stvo Expert solutions, 2016, 384 p. (In Russ.).
- 3. Zhukov N.P., Maynikova N.F. *Mnogomodelnyye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv tverdykh materialov i izdeliy: monografiya* [Multimodel methods and means of non-destructive testing of thermophysical properties of solid materials and products: monograph], Moscow: Mashinostroenie-1, 2004, 288 p. (In Russ.).
- 4. Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V. *Tekhnicheskiye svoystva polimernykh materialov: uchebno-spravochnoye posobiye* [Technical properties of polymer materials: educational and reference manual], St. Petersburg: Professiya, 2005, 248 p. (In Russ.).

- 5. Maynikova N.F., Borodavkin D.G., Rogov I.V., Gribkov A.N. *Metod i izmeritelnaya sistema nerazrushayushchego teplofizicheskogo kontrolya* [Method and measuring system of non-destructive thermophysical control], Tambov: TGTU, 2019, 84 p. (In Russ.).
- 6. Mishchenko S.V., Muromtsev Yu.L., Zhukov N.P., Maynikova N.F., Rogov I.V., Popov O.N. *Mnogomodelnyye metody v mikroprotsessornykh sistemakh nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [Multimodel methods in microprocessor systems for non-destructive testing of thermophysical characteristics of materials], Tambov: TGTU, 2012, 112 p. (In Russ.).
- 7. Zhukov N.P., Maynikova N.F., Rogov I.V., Popov O.N. [Theoretical substantiation of the method of non-destructive testing of thermophysical properties of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 296-302 (In Russ., abstract in Eng.)
- 8. ELCUT: Modelirovaniye elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh poley metodom konechnykh elementov. Versiya 6.6. Rukovodstvo polzovatelya [ELCUT: Modeling of electromagnetic, thermal and elastic fields by the finite element method. Version 6.6. User's Guide], St. Petersburg: Izdatelskiye resheniya, 2023, 290 p. (In Russ.).
- 9 Himmelblau D.M. Analysis of processes by statistical methods. New York; London; Sydney; Toronto: Elsevier John Wiley and Sons, 1970, 960 p.

# Numerische Untersuchung der Wärmeübertragung in einem Zweikörpersystem aus einer linearen Wärmequelle

**Zusammenfassung**: Es sind die Ergebnisse der numerischen Untersuchung des Wärmeübergangs bei der zerstörungsfreien Prüfung der thermophysikalischen Eigenschaften von Objekten aus festen Werkstoffen vorgestellt, die einer thermischen Beeinflussung mit konstanter Energiezufuhr durch einen linearen Heizer in Form eines Bandes ausgesetzt sind. Es ist die Möglichkeit der Anwendung des grundlegenden mathematischen Modells zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit fester Materialien ohne Einführung von Korrekturen betrachtet. Die Regressionsanalyse ist verwendet, um die Probleme der Kalibrierung des Messgeräts zu lösen, mit dem die untersuchte Methode durchgeführt war.

# Étude numérique du transfert de chaleur dans un système à deux corps à partir d'une source de chaleur linéaire

**Résumé:** Sont présentés les résultats de l'étude numérique du transfert de chaleur dans le contrôle non destructif par sonde des propriétés thermiques des objets de matériaux solides exposés à la chaleur avec une alimentation constante d'un appareil de chauffage linéaire sous forme de bande. Est envisagé un modèle mathématique de base pour déterminer la conductivité thermique des matériaux solides sans introduire de corrections. Pour résoudre les problèmes de graduation du dispositif de mesure mettant en œuvre la méthode considérée; est utilisée une analyse de régression.

Авторы: Попов Олег Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; Майникова Нина Филипповна — доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; Рогов Иван Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

### ГРУППИРОВКА ПЕРЕМЕННЫХ В РЕГРЕССИОННОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ РИСКА

С. И. Носков⊠, Е. С. Попов, А. А. Бутин

Кафедра «Информационные системы и защита информации», sergey.noskov.57@mail.ru; ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия

**Ключевые слова:** группировка; задача линейно-булева программирования; индексное множество; комбинированная регрессионная модель риска; мощность множества.

Аннотация: Дан краткий обзор публикаций, посвященных группировке переменных в регрессионных моделях. В частности, рассмотрены: задача выбора сгруппированных переменных для точного прогнозирования в регрессии; оценка в многомерной линейной модели с сильно коррелирующими переменными; новый метод решения проблемы выбора групповой переменной в модели пропорциональных рисков Кокса; проблемы выбора переменных в модели логистической регрессии; расширение группового Лассо на модели логистической регрессии; способ применения одномерных моделей отдельно для каждого уровня группирующей переменной; проблема выбора сгруппированных переменных в моделях Пуассона; модификация эластичной сети и ее адаптивного аналога, позволяющая учитывать при группировке малую и среднюю корреляцию между объясняющими переменными. Разработан алгоритмический способ идентификации параметров регрессионной комбинированной функции риска и группировки независимых переменных, входящих в состав ее линейной и кусочно-линейной частей. При этом число элементов в соответствующих индексных множествах считается известным. Показано, что если в качестве метода определения параметров применяется метод наименьших модулей, то эта задача сводится к задаче линейнобулева программирования. Рассмотрен численный пример.

#### Введение

Методы математического моделирования, в частности, регрессионного, давно и успешно применяются при исследовании сложных технических и социально-экономических систем. Одной из подлежащих решению задач при этом является правильная верификация разрабатываемых моделей, состоящая, в том числе, в подборе адекватных форм связи между задействованными переменными (факторами) и их группировке. Так, в работе [1] рассматривается задача выбора сгруппированных переменных для точного прогнозирования в регрессии. Такая проблема естественным образом возникает во многих практических ситуациях, наиболее важным и известным примером которых является задача многофакторного дисперсионного анализа. Вместо выбора факторов путем поэтапного обратного исключения внимание концентрируется на точности оценки в рамках расширения Лассо и алгоритма LARS (англ. Least Angle Regression). Предлагаются эффективные способы модификации этих методов и показывается, что это обеспе-

чивает превосходную производительность по сравнению с традиционным методом пошагового обратного исключения в задачах выбора факторов. В работе [2] рассматривается оценка в многомерной линейной модели с сильно коррелирующими переменными. Предлагается сначала сгруппировать переменные в кластеры, а затем выполнить разреженную оценку, например Лассо, для представителей кластеров или групповое Лассо на основе структуры кластеров. Описывается новый восходящий алгоритм агломеративной кластеризации, основанный на канонических корреляциях, и показывается, что он находит оптимальное решение и является статистически последовательным. В статье [3] разрабатывается новый метод решения проблемы выбора групповой переменной в модели пропорциональных рисков Кокса. Данный метод не только эффективно удаляет незначимые группы, но и сохраняет гибкость выбора переменных внутри идентифицированных групп. Исследование [4] посвящено изучению проблемы выбора переменных в модели логистической регрессии. Предлагается новый метод выбора переменных, основанный на логистической эластичной сети. Доказывается, что он имеет эффект группировки, то есть сильно коррелированные предикторы имеют тенденцию входить в модель или выходить из нее вместе. Логистическая эластичная сеть особенно полезна, когда число предикторов намного превышает количество наблюдений. В работе [5] проводится расширение группового Лассо на модели логистической регрессии и описывается эффективный алгоритм, который особенно подходит для задач большой размерности и может применяться к обобщенным линейным моделям для решения соответствующей задачи выпуклой оптимизации. В публикации [6], используя идеи уменьшения размерности в регрессионных моделях, описывается способ применения одномерных моделей отдельно для каждого уровня группирующей переменной. Эти модели менее общие, чем обычно изучаемые модели взаимодействия, но они могут привести к очень простым результатам, а также к простым и полезным сводным графикам. В исследовании [7] рассматривается проблема выбора сгруппированных переменных в моделях Пуассона с нулевым расширением посредством регуляризации группового моста. Штрафные коэффициенты вычисляются с использованием аппроксимации наименьших квадратов и уточняются с помощью эффективного алгоритма группового спуска. В статье [8] предложена модель логистической регрессии с  $l_{p,q}$  -регуляризацией, которая могла бы быть успешно применена к задачам выбора переменных с разреженной групповой структурой. Работа [9] посвящена разработке модификации эластичной сети и ее адаптивного аналога, позволяющей учитывать при группировке малую и среднюю корреляцию между объясняющими переменными и одновременно обеспечивать согласованность выбора результирующих переменных.

#### Постановка задачи

Пусть на выборке данных длины n заданы значения зависимой  $y_k$  и независимых  $x_{k,i}$  переменных,  $k=\overline{1,n},\ i=\overline{1,m}.$ 

В работе [10], в предположении, что все переменные детерминированы, сформулирована задача оценивания параметров комбинированной кусочнолинейной регрессии (модели)

$$y_{k} = \sum_{i \in I_{1}} \alpha_{i} x_{k i} + \min_{j \in I_{2}} \{\beta_{j} x_{k j}\} + \varepsilon_{k}, \ k = \overline{1, n}.$$
 (1)

Здесь  $\varepsilon_k$  ,  $k=\overline{1,n}$  , — ошибки аппроксимации;  $I_1,I_2$  — наперед заданные индексные множества такие, что

$$I_1 \cup I_2 = \{1, 2, ..., m\}.$$

При этом выполнение традиционно накладываемого при подобных построениях условия

$$I_1 \cap I_2 = \emptyset$$

не требуется, так как допускается включение некоторых (или всех) независимых переменных одновременно и в линейную, и в кусочно-линейную компоненты модели (1). Следовательно, в общем случае  $|I_1|+|I_2|\geq m$ , где |C| — число элементов в множестве C, его мощность.

Идентификация параметров  $\alpha_i, i \in I_1, \beta_j, j \in I_2$  в [10] проводится с применением метода наименьших модулей (**МНМ**) путем минимизации функции  $J_1(\alpha,\beta)$ 

$$J_1(\alpha, \beta) = \sum_{k=1}^n \left| y_k - \sum_{i \in I_1} \alpha_i x_{ki} - \min_{j \in I_2} \left\{ \beta_j x_{kj} \right\} \right| \to \min.$$
 (2)

Задача (2) сводится к следующей задаче линейно-булева программирования (**ЛБП**):

$$\sum_{i \in I_1} \alpha_i x_{ki} + z_k + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n};$$
 (3)

$$z_k \le \beta_j x_{kj}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j \in I_2; \tag{4}$$

$$\beta_{j} x_{k j} - z_{k} \le (1 - \sigma_{k j}) M, \quad k = \overline{1, n}, \quad j \in I_{2};$$
 (5)

$$\sum_{j \in I_2} \sigma_{k j} = 1, \quad u_k \ge 0, \quad v_k \ge 0, \quad k = \overline{1, n};$$
 (6)

$$\sigma_{kj} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j \in I_2;$$
 (7)

$$J_1(\alpha,\beta) = \sum_{k=1}^{n} (u_k + v_k) \to \min.$$
 (8)

Здесь M — заранее выбранное большое положительное число.

Ранее одним из авторов (см., например, [11]) предложен способ идентификации параметров регрессионной функции риска

$$y_k = \max \left\{ \beta_1 x_{k1}, \beta_2 x_{k2}, ..., \beta_m x_{km} \right\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n},$$
 (9)

противоположной по своей содержательной интерпретации по отношению к кусочно-линейной составляющей модели (1). В качестве как независимых, так и зависимой переменных в модели (9) задействованы негативные для анализируемого объекта факторы, такие как убытки, загрязнения, риски, технические сбои, отказы оборудования, ущерб, техногенные аварии и т.д. При этом, в соответствии с (9), значение переменной у определяется максимальным значением одного из локальных негативных независимых факторов, а любое уменьшение значений других предикторов на данный исход не влияет. Параметры функции риска при использовании МНМ оцениваются с помощью решения задачи ЛБП.

Рассмотрим противоположную по смыслу по отношению к модели (1) комбинированную кусочно-линейную функцию риска

$$y_k = \sum_{i \in I_1} \alpha_i x_{ki} + \max_{j \in I_2} \{\beta_j x_{kj}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}.$$
 (10)

Поставим более общую, чем (2), задачу оценивания параметров модели (10)

$$J_{2}(\alpha, \beta, I_{1}, I_{2}) = \sum_{k=1}^{n} \left| y_{k} - \sum_{i \in I_{1}} \alpha_{i} x_{k i} - \max_{j \in I_{2}} \left\{ \beta_{j} x_{k j} \right\} \right| \to \min.$$
 (11)

Необходимо отметить, что в результате решения задачи (11) следует не только вычислить вектора оценок параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , но и сформировать состав индексных множеств  $I_1$  и  $I_2$  при наперед заданных их мощностях:  $|I_1|=p_1$ ,  $|I_2|=p_2$ , то есть сгруппировать эти множества.

## Сведение задачи группировки предикторов в регрессионной функции риска с линейной составляющей к задаче линейно-булева программирования

Решение задачи (11), как и задачи (2), также сводится к несколько расширенной, по сравнению с (3) - (8), задаче ЛБП с использованием соответствующих вычислительных приемов [10 - 12]:

$$\sum_{i=1}^{m} \alpha_{i} x_{k i} + z_{k} + u_{k} - v_{k} = y_{k}, \quad k = \overline{1, n};$$
(12)

$$-\delta_i M_1 \le \alpha_i \le \delta_i M_1, \quad i = \overline{1, m}; \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^{m} \delta_i = p_1; \tag{14}$$

$$z_k \ge \beta_j x_{kj}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m};$$
 (15)

$$\beta_{i}x_{k,i} - z_{k} \ge (\sigma_{k,i} - 1)M_{2}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, m};$$
 (16)

$$\sum_{i=1}^{m} \sigma_{k j} = 1, \ u_k \ge 0, \ v_k \ge 0, \quad k = \overline{1, n};$$
 (17)

$$\beta_j \le \gamma_j M_3, \quad j = \overline{1, m};$$
 (18)

$$\sum_{j=1}^{m} \gamma_j = p_2; \tag{19}$$

$$\sigma_{ki} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m};$$
 (20)

$$\delta_i \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}; \tag{21}$$

$$\gamma_{j} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, m};$$
(22)

$$J_2(\alpha, \beta, I_1, I_2) = \sum_{k=1}^{n} (u_k + v_k) \to \min.$$
 (23)

Здесь  $M_1, M_2, M_3$  — заранее выбранные большие положительные числа.

После решения задачи (12) – (23) состав множеств  $I_1$  и  $I_2$  формируется по следующим правилам:

$$\delta_i = 1 \Rightarrow i \in I_1, \ i = \overline{1, m};$$
  
 $\gamma_j = 1 \Rightarrow j \in I_2, \ j = \overline{1, m}.$ 

Разумеется, предикторы с нулевыми значениями параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , не войдут соответственно в состав множеств  $I_1$  и  $I_2$ , а также в линейную и кусочнолинейную части комбинированной функции риска (10). Заметим, что вызывает интерес задача построения регрессии (10) с интервальным заданием исходных данных и использованием соответствующих методов (см., например, [13, 14]).

Рассмотрим простой численный пример. Будем строить регрессионную комбинированную функцию риска (10).

Пусть дана выборка данных: n = 6, m = 5,

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 3 & 1 & 5 \\ 8 & 2 & 8 & 4 & 6 \\ 2 & 7 & 3 & 7 & 5 \\ 6 & 3 & 9 & 4 & 6 \\ 9 & 7 & 4 & 1 & 5 \\ 4 & 1 & 8 & 5 & 7 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \\ 2 \\ 5 \\ 7 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

Зададим мощность множеств  $I_1$  и  $I_2$ :

$$|I_1| = 2$$
;  $|I_2| = 2$ .

В результате решения задачи ЛБП (12) – (23) получим значения неизвестных:

$$I_1 = \{1, 5\}; I_2 = \{2, 3\}.$$

При этом суммарная абсолютная ошибка аппроксимации равна 0,09.

Таким образом, регрессионная комбинированная функция риска примет вид

$$y_k = 0.71x_{k1} - 0.38x_{k5} + \max\{0.36x_{k2} \ 0.34x_{k3}\} + \varepsilon_k, \ k = \overline{1, 6}.$$

Заметим, что независимая переменная  $x_4$  в нее не вошла.

#### Заключение

Предложен способ идентификации параметров регрессионной комбинированной функции риска и группировки предикторов, входящих в состав ее линейной и кусочно-линейной составляющих. При этом мощности соответствующих индексных множеств считаются заданными. Показано, что в случае, когда в качестве метода оценивания неизвестных параметров используется метод наименьших модулей, эта задача сводится к задаче линейно-булева программирования.

#### Список литературы

- 1. Yuan, M. Model Selection and Estimation in Regression with Grouped Variables / M. Yuan, Y. Lin // Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology. -2006. Vol. 68, No. 1. P. 49 67. doi: 10.1111/j.1467-9868.2005.00532.x
- 2. Bühlmann, P. Correlated variables in regression: Clustering and sparse estimation / P. Bühlmann, S. van de Geer, C.-H. Zhang // Journal of Statistical Planning and Inference. 2013. Vol. 143, No. 11. P. 1835 1858. doi: 10.1016/j.jspi.2013.05.019
- 3. Wang, S. Hierarchically penalized Cox regression with grouped variables / S. Wang, B. Nan, N. Zhu, J. Zhu // Biometrika. 2009. Vol. 96, No. 2. P. 307 322. doi: 10.1093/biomet/asp016
- 4. Variable Selection in Logistic Regression Model / S. Zhang, L. Zhang, K. Qiu, Y. Lu, B. Cai // Chinese Journal of Electronics. 2015. Vol. 24, No. 4. P. 813 817. doi: 10.1049/cje.2015.10.025
- 5. Meier, L. The Group Lasso for Logistic Regression / L. Meier, S. van de Geer, P. Bühlmann // Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology. 2008. Vol. 70, No. 1. P. 53 71. doi: 10.1111/j.1467-9868.2007.00627.x
- 6. Cook, R. D. Partial One-Dimensional Regression Models / R. D. Cook, S. Weisberg // The American Statistician. 2004. Vol. 58, No. 2. P. 110 116. doi: 10.1198/0003130043240
- 7. Group Regularization for Zero-Inflated Poisson Regression Models with an Application to Insurance Ratemaking / S. Chowdhury, S. Chatterjee, H. Mallick, P. Banerjee, B. Garai // Journal of Applied Statistics. 2019. Vol. 46, No. 9. P. 1567 1581. doi: 10.1080/02664763.2018.1555232
- 8. Group Logistic Regression Models with  $l_{p,q}$  Regularization / Y. Zhang, C. Wei, C. Wei, X. Liu // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 13. P. 2227. doi: 10.3390/math10132227
- 9. Algamal, Z. Penalized Poisson Regression Model using adaptive modified Elastic Net Penalty / Z. Algamal, M. H. Lee // Electronic Journal of Applied Statistical Analysis. 2015. Vol. 8, No. 2. doi: 10.1285/i20705948v8n2p236
- 10. Носков, С. И. Идентификация параметров комбинированной кусочнолинейной регрессионной модели // Вестник Югорского государственного университета. -2022. -№ 4(67). C. 115 119.
- 11. Носков, С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 417 421.

- 12. Носков, С. И. Оценка уровня уязвимости объектов транспортной инфраструктуры: формализованный подход / Носков С. И., Протопопов В. А. // Современные технологии. Современный анализ. Моделирование. 2011. № 4(32). С. 241 244.
- 13. Kreinovich, V. Approximate linear algebra is intractable / V. Kreinovich, A. V. Lakeyev, S. I. Noskov // Linear Algebra and its Applications. -1996. Vol. 232, No. 1-3. P. 45-54.
- 14. Носков, С. И. Точечная характеризация множеств решений интервальных систем линейных алгебраических уравнений // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. -2018. № 1. С. 8-13.

### **Grouping of Variables in the Regression Combined Risk Function**

S. I. Noskov<sup>⊠</sup>, E. S. Popov, A. A. Butin

Department of Information Systems and Information Security, sergey.noskov.57@mail.ru; Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Keywords:** grouping; linear Boolean programming problem; index set; combined risk regression model; set cardinality.

Abstract: The paper provides a brief overview of publications devoted to grouping variables in regression models. In particular, we consider: the problem of selecting grouped variables for accurate forecasting in regression; estimation in a multivariate linear model with highly correlated variables; a new method for solving the problem of group variable selection in the Cox proportional hazards model; problems of selecting variables in a logistic regression model; extending group Lasso to logistic regression models; the method of applying univariate models separately for each level of the grouping variable; the problem of selecting grouped variables in Poisson models; modification of the elastic network and its adaptive analogue, allowing for small and medium correlations between explanatory variables to be taken into account when grouping. An algorithmic method has been developed for identifying the parameters of the regression combined risk function and grouping the independent variables included in its linear and piecewise linear parts. In this case, the number of elements in the corresponding index sets is considered known. It is shown that if the least modulus method is used as a method for determining parameters, this problem is reduced to a linear Boolean programming problem. A numerical example is given.

#### References

- 1. Yuan M., Lin Y. Model Selection and Estimation in Regression with Grouped Variables, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 2006, vol. 68, no. 1, pp. 49-67. doi: 10.1111/j.1467-9868.2005.00532.x
- 2. Bühlmann P., Geer S. van de, Zhang C.-H. Correlated variables in regression: Clustering and sparse estimation, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2013, vol. 143, no. 11, pp. 1835-1858. doi: 10.1016/j.jspi.2013.05.019
- 3. Wang S., Nan B., Zhu N., Zhu J. Hierarchically penalized Cox regression with grouped variables, *Biometrika*, 2009, vol. 96, no. 2, pp. 307-322. doi: 10.1093/biomet/asp016
- 4. Zhang S., Zhang L., Qiu K., Lu Y., Cai B. Variable Selection in Logistic Regression Model, *Chinese Journal of Electronics*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 813-817. doi: 10.1049/cje.2015.10.025

- 5. Meier L., Geer S. van de, Bühlmann P. The Group Lasso for Logistic Regression, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 2008, vol. 70, no. 1, pp. 53-71. doi: 10.1111/j.1467-9868.2007.00627.x
- 6. Cook R.D., Weisberg S. Partial One-Dimensional Regression Models, *The American Statistician*, 2004, vol. 58, no. 2, pp. 110 116. doi: 10.1198/0003130043240
- 7. Chowdhury S., Chatterjee S., Mallick H., Banerjee P., Garai B. Group Regularization for Zero-Inflated Poisson Regression Models with an Application to Insurance Ratemaking, *Journal of Applied Statistics*, 2019, vol. 46, no. 9, pp. 1567-1581. doi: 10.1080/02664763.2018.1555232
- 8. Zhang Y., Wei C., Wei C., Liu X. Group Logistic Regression Models with  $l_{p,q}$  Regularization, *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 13, pp. 2227. doi: 10.3390/math10132227
- 9. Algamal Z., Lee M.H. Penalized Poisson Regression Model using adaptive modified Elastic Net Penalty, *Electronic Journal of Applied Statistical Analysis*, 2015, vol. 8, no. 2. doi: 10.1285/i20705948v8n2p236
- 10. Noskov S.I. [Identification of parameters of a combined piecewise linear regression model], *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Yugra State University], 2022, no. 4 (67), pp. 115-119 (In Russ., abstract in Eng.)
- 11. Noskov S.I. [Identification of parameters of a piecewise linear risk function], *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017, vol. 1, pp. 417-421 (In Russ., abstract in Eng.)
- 12. Noskov S.I., Protopopov V.A. [Assessing the level of vulnerability of transport infrastructure objects: a formalized approach], *Sovremennyy tekhnologii*. *Sovremennyy analiz*. *Modelirovaniye* [Modern technologies. Modern analysis. Modeling], 2011, no. 4(32), pp. 241-244. (In Russ., abstract in Eng.)
- 13. Kreinovich V., Lakeyev A.V., Noskov S.I. Approximate linear algebra is intractable, *Linear Algebra and its Applications*, 1996, vol. 232, no. 1-3, pp. 45-54.
- 14. Noskov S.I. [Point characterization of sets of solutions of interval systems of linear algebraic equations], *Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v upravlenii slozhnymi sistemami* [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2018, no. 1, pp. 8-13. (In Russ., abstract in Eng.)

# Gruppierung von Variablen in einer kombinierten Regressionsrisikofunktion

Zusammenfassung: Es ist ein kurzer Überblick über Veröffentlichungen gegeben, die sich mit der Gruppierung von Variablen in Regressionsmodellen befassen. Insbesondere werden folgende Punkte berücksichtigt: das Problem der Auswahl gruppierter Variablen für eine genaue Prognose bei der Regression; Schätzung in einem multivariaten linearen Modell mit stark korrelierten Variablen; eine neue Methode zur Lösung des Problems der Auswahl einer Gruppenvariablen im Cox-Proportional-Hazards-Modell; Probleme der Variablenauswahl in logistischen Regressionsmodellen; Erweiterung von Group Lasso auf logistische Regressionsmodelle; eine Methode zum separaten Anwenden invarianter Modelle für jede Ebene der Gruppierungsvariablen; das Problem der Auswahl von Gruppierungsvariablen in Poisson-Modellen; eine Modifikation des elastischen Netzwerks und seines adaptiven Analogons, die es ermöglicht, kleine und mittlere Korrelationen zwischen erklärenden Variablen bei der Gruppierung zu berücksichtigen. Es ist eine algorithmische Methode zur Identifizierung der Parameter einer kombinierten Regressionsrisikofunktion und zur Gruppierung unabhängiger Variablen entwickelt, die in ihren linearen und stückweise linearen Teilen enthalten sind. In diesem Fall gilt die Anzahl der Elemente in den entsprechenden Indexsätzen als bekannt. Es ist gezeigt, dass dieses Problem auf ein linear-Boolesches Programmierproblem reduziert wird, wenn die Methode der kleinsten absoluten Werte als Methode zur Bestimmung von Parametern verwendet wird. Es ist ein Zahlenbeispiel betrachtet.

# Regroupement des variables dans la fonction de régression combinée du risqué

**Résumé:** Est donnée la révue des publications sur le regroupement des variables dans les modèles de régression. En particulier, sont examinées les questions de la sélection des variables groupées pour une prédiction précise en régression; de l'évaluation dans un modèle linéaire multivarié avec des variables fortement corrélées; d'une nouvelle méthode pour résoudre le problème de la sélection de variables de groupe dans le modèle de risque proportionnel de Cox; des problèmes de sélection de variables dans le modèle de régression logistique; de l'extension du Lasso de groupe au modèle de régression logistique; de la méthode d'application des modèles unidimensionnels séparément pour chaque niveau de la variable de groupe; le problème du choix des variables groupées dans les modèles de Poisson; de la modification du réseau élastique et de son analogue adaptatif permettant de prendre en compte la corrélation faible et moyenne entre les variables explicatives lors du regroupement. Est mis au point le moyen algorithmique pour identifier les paramètres d'une fonction de risque combinée de régression et pour regrouper les variables indépendantes qui composent ses parties linéaires et linéaires par morceaux. Dans ce cas, le nombre d'éléments dans les ensembles d'indices correspondants est considéré comme connu. Est démontré que si la méthode des plus petits modules est utilisée comme méthode de définition des paramètres, cette tâche est réduite à une tâche de programmation linéairemais booléenne. Est considéré un exemple numérique.

**Авторы:** *Носков Сергей Иванович* — доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Попов Егор Сергеевич* — магистрант; *Бутин Александр Алексеевич* — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.034-042

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕРМОВОЛЮМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ

Д. М. Мордасов<sup>⊠</sup>, П. А. Шерстеникин, Н. А. Харитонов, Е. Б. Панченко

Кафедра «Материалы и технология», mit@tstu.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** барботаж; газовое состояние; объем выделяющегося газа; повышение точности; термоволюмометрия; термический анализ.

Аннотация: В результате проведенных исследований осуществлен анализ процессов, происходящих в термоволюмометрической измерительной системе. Определены функции влияния объема измерительной емкости, степени ее заполнения исследуемым веществом, температуры жидкости в барботажной емкости и температуры в измерительной емкости на систематическую погрешность измерения объема выделяющегося газа, осуществлена оценка вклада каждой из них в общую погрешность. Показано, что наибольшее влияние на общую погрешность оказывает степень заполнения измерительной емкости исследуемым веществом. Получена зависимость, учитывающая влияние объема измерительной емкости, степени ее заполнения исследуемым веществом, температуры жидкости в барботажной емкости и температуры в измерительной емкости на результат измерений объема выделяющегося газа, позволяющая повысить точность термоволюмометрического метода анализа веществ путем введения поправки в результат измерений.

#### Введение

Термический анализ является распространенным физико-химическим методом исследования. Термоаналитические методы применяют для исследования процессов, происходящих в веществах или многокомпонентных системах при термическом воздействии на них [1-3]. В большинстве случаев термическое воздействие на материал приводит к изменению его массы. Данный эффект положен в основу широко распространенных методов термогравиметрии [4].

Изменение массы образца при его нагреве происходит за счет протекания реакций дегидратации, дегидроксилации, разложения веществ с выделением газообразных продуктов, приводящих к увеличению количества газовой фазы в реакционном пространстве. Термические методы анализа, основанные на определении объема выделяющихся газов, называют термоволюмометрическими [1, 5 - 8]. В научной литературе можно встретить другие названия данного метода – метод определения объема выделившихся газов (**ОВГ**) или EGD (*англ*. Evolved Gas Detection).

Основным преимуществом термоволюмометрических методов анализа является простота их реализации, оперативность получения измерительной информации, а также возможность анализа образцов, массы которых в десятки и сотни раз превышают рекомендованные значения для термогравиметрии. Применение об-

разцов большей массы особенно важно при исследовании смесей минералов, композитов сложного состава, выборе порошковых катализаторов для обеспечения представительности проб. Кроме того, особенности конструктивной реализации термоволюмометрических методов позволяют эффективно решать задачи исследования смесей, переходящих при нагревании в пену и значительно увеличивающихся в объеме.

Обнаружение и регистрация выделяющихся при нагреве веществ газов могут быть реализованы при помощи различных методик (измерения давления, создаваемого выделяющимися газами, измерения теплопроводности ячейки при прохождении через нее выделяющихся газов, подсчета пузырьков газа, выделяющихся из барботажной трубки, соединенной с измерительной емкостью и др.).

При реализации любой измерительной методики возникают погрешности, которые носят случайный или систематический характер. Повышение точности измерений возможно путем выявления, изучения источников систематической погрешности и введения поправок в результат измерений.

*Цель работы* – повышение точности термоволюмометрического метода анализа веществ на основе изучения влияния температуры на состояние реализующей его измерительной системы.

#### Материалы и методы исследований

При проведении экспериментальных исследований использовался пентагидрат сульфата меди (II)  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , применяемый многими исследователями в качестве образцового вещества для демонстрации точности термических методов анализа [9 – 14].

На рисунке 1 показана термоволюмометрическая измерительная система. Измерительная емкость I с навеской исследуемого вещества 2 размещена в трубчатой печи 3, в стенку которой встроен термоэлектрический преобразователь 4. Выход преобразователя 4 соединен с цифровым показывающим прибором 5. Измерительная емкость I соединена через капилляр 6 с барботажной трубкой 7, размещенной в барботажной емкости 8, заполненной водой, в верхнюю крышку которой вмонтирован электромеханический преобразователь 9. Выход преобразователя 9 подключен к счетчику импульсов I0. Барботажная емкость 8 с целью поддержания в ней постоянной температуры помещена в термостатирующую емкость I1.

Построение экспериментальных кривых и анализ данных осуществлялся с применением программного пакета для автоматизированной обработки инженерных и исследовательских данных TableCurve 2D [15 – 17].

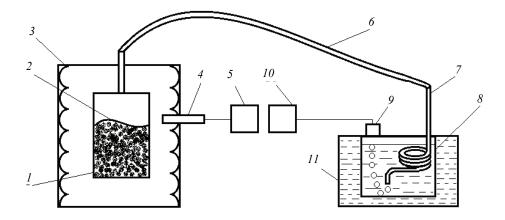


Рис. 1. Термоволюмометрическая измерительная система

#### Основные результаты и обсуждение

При реализации термоволюмометрического метода на повторяемость воспроизводимость и точность измерений оказывают влияние факторы, присущие большинству методов термического анализа [1, 2]: скорость нагрева образца, его масса, размер частиц и насыпная плотность. Механизмы данного влияния описаны в научно-технической литературе [1, 2, 10].

Кроме указанных выше погрешностей, связанных с проведением измерений и пробоподготовкой, при использовании барботажного метода регистрации объема газа имеют место инструментальные источники погрешности. К ним относятся влияние объема газового пространства, незаполненного исследуемым материалом (свободное газовое пространство), и влияние температуры жидкости в барботажной емкости.

При нагревании измерительной емкости I с исследуемым веществом 2 избыточный объем газа, приводящий к появлению на выходе барботажной трубки T пузырька (пузырьков) объемом  $V_{\Pi}$ , формируется из объема газа  $\Delta V_{\Pi}^{T}$ , выделившегося при нагревании исследуемого вещества до температуры T, и изменения объема газа  $\Delta V_{\Gamma,\Pi}^{T}$  в свободном газовом пространстве при повышении температуры до T. В соответствии с законом  $\Gamma$ ей-Люссака

$$\frac{V_{\Pi}}{\Delta V_{\mathrm{M}}^{T} + \Delta V_{\Gamma,\Pi}^{T}} = \frac{T_{\mathrm{xk}}}{T},$$

откуда

$$\Delta V_{\rm M}^T = \frac{V_{\rm II} \cdot T}{T_{\rm sc}} - \Delta V_{\rm \Gamma, II}^T \,, \tag{1}$$

где  $T_{\rm ж}$  – температура жидкости в барботажной емкости.

При изменении температуры свободного газового пространства в измерительной емкости в изобарическом процессе состояние газа в ней подчиняется закону пропорциональной зависимости объема газа от абсолютной температуры:

$$\frac{V_{\Gamma,\Pi}^0 + \Delta V_{\Gamma,\Pi}^T}{V_{\Gamma,\Pi}^0} = \frac{T}{T_0} ,$$

откуда

$$\Delta V_{\rm r.n}^T = V_{\rm r.n}^0 \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right),\tag{2}$$

где  $V_{\scriptscriptstyle{\Gamma\Pi}}^0$  – объем газа при начальной температуре  $T_0$ .

После подстановки (2) в (1) получим

$$\Delta V_{\rm M}^T = \frac{V_{\rm II}T}{T_{\rm jk}} - V_{\rm PII}^0 \left(\frac{T}{T_0} - 1\right). \tag{3}$$

Приведем изменение объема газовой фазы, выделившейся из исследуемого образца, к температуре  $T_0$ :

$$\frac{\Delta V_{\rm M}^T}{\Delta V_{\rm M}^0} = \frac{T}{T_0} \; ,$$

откуда

$$\Delta V_{\rm M}^T = \Delta V_{\rm M}^0 \frac{T}{T_0},\tag{4}$$

где  $\Delta V_{\rm M}^0$  — объем газа, выделившегося при нагреве исследуемого вещества, приведенный к температуре  $T_0$ .

После подстановки (4) в (3), приняв  $T_0 = T_{\text{ж}}$ , получим

$$\Delta V_{\rm M}^0 = V_{\rm \Pi} - V_{\rm \Gamma.\Pi}^0 \bigg( 1 - \frac{T_{\rm JK}}{T} \bigg) = V_{\rm \Pi} - \Delta_{\rm a6c} \,,$$

где  $\Delta_{{
m afc}} = V_{{
m r.n.}}^0 \left( 1 - \frac{T_{
m w}}{T} \right)$  — абсолютная погрешность измерения объема газовой фа-

зы, выделившейся из материала, вызванная влиянием свободного газового пространства в измерительной емкости, температуры жидкости в барботажной емкости, а также изменением состояния свободной газовой фазы при нагреве измерительной емкости.

Представим объем газовой фазы при начальной температуре в виде

$$V_{\Gamma,\Pi}^{0} = (1 - K)V_{1}, \tag{5}$$

где  $K = \frac{V_{\rm B}}{V_{\rm 1}}$  — степень заполнения измерительной емкости;  $V_{\rm 1}, \ V_{\rm B}$  — объемы изме-

рительной емкости и исследуемого вещества соответственно.

С учетом (5) выражение для  $\Delta_{a\delta c}$  примет вид

$$\Delta_{\text{a6c}} = (1 - K) V_1 \left( 1 - \frac{T_{\text{xc}}}{T} \right).$$
(6)

На рисунке 2 представлены термоволюмограммы разложения пентагидрата сульфата меди (II) CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, построенные по результатам, полученным непосредственно в ходе эксперимента ( $V_{\Pi}(T)$ ) и после введения поправки в эти результаты в соответствии с формулой (6) ( $\Delta V_{\rm M}^{0}(T)$ ).

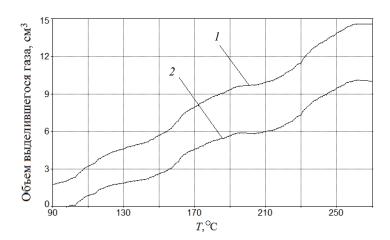


Рис. 2. Термоволюмограммы разложения пентагидрата сульфата меди (II):

$$1 - V_{\Pi}(T); 2 - \Delta V_{M}^{0}(T)$$

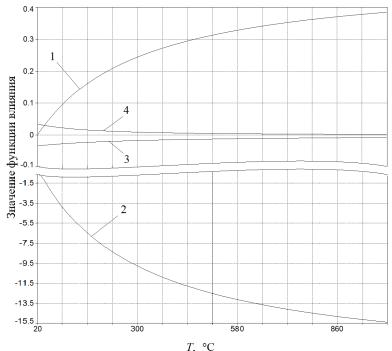


Рис. 3. Функции влияния:  $I-\partial\Delta_{\mathrm{a6c}}/\partial V_1$  ;  $2-\partial\Delta_{\mathrm{a6c}}/\partial K$  ;  $3-\partial\Delta_{\mathrm{a6c}}/\partial T_{\mathrm{x}}$  ;  $4-\partial\Delta_{\mathrm{a6c}}/\partial T$ 

Для анализа степени влияния величин, входящих в правую часть выражения

(6), на 
$$\Delta_{\mathrm{aбc}}$$
 найдем частные производные  $\frac{\partial \Delta_{\mathrm{aбc}}}{\partial V_1} = (1 - K) \left(1 - \frac{T_{\mathrm{ж}}}{T}\right);$ 

$$\frac{\partial \Delta_{\mathrm{a6c}}}{\partial K} = V_1 \left( \frac{T_{_{\mathsf{K}}}}{T} - 1 \right); \ \frac{\partial \Delta_{\mathrm{a6c}}}{\partial T_{_{\mathsf{K}}}} = \frac{V_1}{T} (K - 1); \ \frac{\partial \Delta_{\mathrm{a6c}}}{\partial T} = V_1 \frac{T_{_{\mathsf{K}}}}{T^2} (1 - K) \ .$$

На рисунке 3 для K=0.5 и  $V_1=20$  см $^3$  построены найденные выше функции влияния. Анализ значений функций показывает, что наибольшее влияние на величину  $\Delta_{\rm a6c}$  оказывает степень заполнения измерительной емкости исследуемым веществом: ее вклад в общую погрешность составляет более 95 %. Заметное влияние температур T и  $T_{\rm ж}$ , а также объема измерительной емкости наблюдается только на начальном этапе нагрева, где текущая температура соизмерима с температурой жидкости в барботажной емкости.

#### Заключение

В результате проведенных исследований выявлены источники систематической погрешности термоволюмометрического метода анализа веществ. Определены функции влияния объема измерительной емкости, степени ее заполнения исследуемым веществом, температуры жидкости в барботажной емкости и температуры в измерительной емкости на систематическую погрешность измерения объема выделяющегося газа, осуществлена оценка вклада каждой из них в общую погрешность. Наибольшее влияние на общую погрешность оказывает степень заполнения измерительной емкости исследуемым веществом. Получена зависимость, учитывающая влияние объема измерительной емкости, степени ее запол-

нения исследуемым веществом, температуры жидкости в барботажной емкости и температуры в измерительной емкости на результат измерений объема выделяющегося газа. Введение поправки в результат измерений на основе полученной зависимости позволит повысить точность термоволюмометрического метода анализа веществ. Кроме того, коррекция результата измерений объема выделившегося в ходе нагрева исследуемого вещества газа позволяет определить объем газа, приведенный к нормальным условиям, что значительно облегчает дальнейший анализ термоволюмограмм, позволяет определять потерю массы вещества и рассчитывать кинетические параметры протекающих реакций.

#### Список литературы

- 1. Уэндландт, У. Термические методы анализа / У. Уэндландт; пер. с англ. под ред. В. А. Степанова, В. А. Берштейна. М.: Мир, 1978. 526 с.
- 2. Шестак, Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ / Я. Шестак. М.: Мир, 1987. 456 с.
- 3. Изучение кинетики топохимических процессов в неизотермическом режиме дериватографическим методом / Ю. А. Ферапонтов, С. Б. Путин, Л. Л. Ферапонтова, П. Ю. Путин // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. − 2009. − Т. 15, № 4. − С. 826 835.
- 4. Губайдуллина, А. М. Теоретические и прикладные аспекты применения методов термического анализа при изучении природных неорганических систем / А. М. Губайдуллина // Вестник Казанского технологического университета. 2010.- № 8.- C. 250-256.
- 5. Новые данные о фазовой диаграмме системы метан-диоксид углерода (биогаз) / В. Г. Колобродов, А. А. Шейнина, Л. В. Карнацевич [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. -2007. -№ 4. -C. 44-48.
- 6. Ishikawa, T. Evolved Gas Detection of Iron Oxyhydroxides / T. Ishikawa, K. Inouye // Journal of Thermal Analysis. 1976. No. 10. P. 399 410. doi: 10.1007/BF01909892
- 7. Moutushi, T. Investigation of reactions occurring in waste combustion ash using thermal analysis coupled with gas analysis and characterization / T. Moutushi, M. J. Castaldi // Waste Management & Research. 2023. Vol. 41, No. 4. P. 871 880. doi: 10.1177/0734242X221134966
- 8. Эффект самоконсервации газовых гидратов: влияние вмещающей среды / А. С. Стопорев, А. А. Сизиков, Т. В. Чешкова [и др.] // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 3(22). С. 1 6. doi: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art25
- 9. Шипунов, Б. П. Изменения энергетики процесса дегидратации кристаллогидрата сульфата меди как результат полевого воздействия / Б. П. Шипунов // Евразийский союз ученых. 2016. No 3-4(24). C. 113-118.
- 10. Thermal Analysis and Decomposition Kinetics of the Dehydration of Copper Sulfate Pentahydrate / L. Cheng, W. Li, Y. Li, Y. Yang, Y. Li, Y. Cheng, D. Song // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. -2018. No. 135(2). P. 1-7. doi:10.1007/s10973-018-7595-y
- 11. El-Houte, S. Dehydration of  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  Studied by Conventional and Advanced Thermal Analysis Techniques / S. El-Houte, A. M. El-Sayed, O. T. Sørensen // Thermochimica Acta. 1989. Vol. 138, No. 1. P. 107 114. doi: 10.1016/0040-6031(89)87245-4
- 12. Kaniewski, M. Thermal Stability of Systems Containing Ammonium Nitrate and Sulfate Salts: an Experimental Study / M. Kaniewski, M. Biegun, J. Hoffmann // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. No. 148. P. 1 14. doi: 10.1007/s10973-023-12328-5

- 13. Preetha, N. Optical and Thermophysical Properties of Copper Sulphate Pentahydrate Single Crystal for Transmission Ultra-Violet Filter and Optical Communication Applications / N. Preetha, S. Muthu, Dr. Thirupathy // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2023. Vol. 34, No. 11. doi: 10.1007/s10854-023-10358-1
- 14. Лидин, Р. А. Химические свойства неорганических веществ / Р. А. Лидин, В. А. Молочко, Л. Л. Андреева. М.: Химия, 2000. 480 с.
- 15. Сытин, А. В. Применение программного пакета Table Curve 3D для аппроксимации теплофизических свойств неона при моделировании смазочных процессов в подшипниках скольжения / А. В. Сытин, В. О. Тюрин, Ф. А. Мамонтов // Современные материалы, техника и технологии. − 2015. − № 1(1). − C. 193 − 196.
- 16. Deliiski, N. Applying the Software Package Table Curve 2D for Computation of Processing Air Medium Temperature During Freezing in a Freezer and Defrosring of Logs / N. Deliiski, N. Tumbarkova, // Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design: International Conference Automatics and Informatics (Sofia, Bulgaria, October 4-6, 2017). -2017. -Vol. 11. -P. 69-76.
- 17. Кузнецов, А. С. Компьютерное моделирование кинетики термоокисления эластомерного композита в программах Table Curve 2D/3D / А. С. Кузнецов // Международный научно-исследовательский журнал. -2018. -№ 3(69). C. 42 45. doi: 10.23670/IRJ.2018.69.027

### Improving the Accuracy of the Thermovolumometric Method of Substance Analysis

D. M. Mordasov, P. A. Sherstenikin, N. A. Kharitonov, E. B. Panchenko

Department of Materials and Technology, mit@tstu.ru, TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** thermal analysis; thermovolumetry; bubbling; precision enhancement; volume of gas evolved; gas state.

**Abstract:** As a result of the conducted research, the analysis of the processes occurring in the thermovolumometric measuring system was carried out. The functions of the influence of the volume of the measuring container, the degree of its filling with the test substance, the temperature of the liquid in the bubble container and the temperature in the measuring container on the systematic error in measuring the volume of the evolved gas are determined, and the contribution of each of them to the total error is assessed. It was shown that the degree of filling of the measuring container with the substance being studied has the greatest influence on the total error. A dependence was obtained that takes into account the influence of the volume of the measuring container, the degree of its filling with the test substance, the temperature of the liquid in the bubble container and the temperature in the measuring container on the result of measuring the volume of the evolved gas, which makes it possible to increase the accuracy of the thermovolumetric method for analyzing substances by introducing a correction to the measurement result.

#### References

- 1. Wendlandt, W. W. Thermal Methods of Analysis, New York: Wiley, 2018, 505 p.
- 2. Shestak Ya. *Teoriya termicheskogo analiza: Fiziko-khimicheskiye svoystva tverdykh neorganicheskikh veshchestv* [Theory of thermal analysis: Physicochemical properties of solid inorganic substances], Moscow: Mir, 1987, 456 p. (In Russ.)

- 3. Ferapontov Yu.A., Putin S.B., Ferapontova L.L., Putin P.Yu. [Study of the kinetics of topochemical processes in a non-isothermal regime by the derivatographic method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 826-835. (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Gubaydullina A.M. [Theoretical and applied aspects of the application of thermal analysis methods in the study of natural inorganic systems], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2010, no. 8, pp. 250-256. (In Russ., abstract in Eng.)
- 5. Kolobrodov V.G., Sheynina A.A., Karnatsevich L.V. [et al.], [New data on the phase diagram of the methane-carbon dioxide (biogas) system] *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Issues of Atomic Science and Technology], 2007, no. 4, pp. 44-48. (In Russ., abstract in Eng.)
- 6. Ishikawa T., Inouye K. Evolved Gas Detection of Iron Oxyhydroxides, *Journal of Thermal Analysis*, 1976, no. 10, pp. 399-410. doi: 10.1007/BF01909892
- 7. Moutushi T., Castaldi M.J. Investigation of reactions occurring in waste combustion ash using thermal analysis coupled with gas analysis and characterization, *Waste Management & Research*, 2023, vol. 41, no. 4, pp. 871-880. doi: 10.1177/0734242X221134966
- 8. Stoporev A.S., Sizikov A.A., Cheshkova T.V. [et al.], [The effect of self-preservation of gas hydrates: the influence of the host environment], *Aktual'nyye problemy nefti i gaza* [Actual problems of oil and gas], 2018, no. 3(22), pp. 1-6. doi: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art25 (In Russ., abstract in Eng.)
- 9. Shipunov B.P. [Changes in the energy of the dehydration process of copper sulfate crystal hydrate as a result of field action], *Yevraziyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2016, no. 3-4(24), pp. 113-118. (In Russ., abstract in Eng.)
- 10. Cheng L., Li W., Li Y., Yang Y., Li Y., Cheng Y., Song D. Thermal Analysis and Decomposition Kinetics of the Dehydration of Copper Sulfate Pentahydrate, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, no. 135(2), pp. 1-7. doi:10.1007/s10973-018-7595-y
- 11. El-Houte S., El-Sayed A.M., Sørensen O.T. Dehydration of CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O Studied by Conventional and Advanced Thermal Analysis Techniques, *Thermochimica Acta*, 1989, vol. 138, no. 1, pp. 107-114. doi: 10.1016/0040-6031(89)87245-44
- 12. Kaniewski M., Biegun M., Hoffmann J. Thermal Stability of Systems Containing Ammonium Nitrate and Sulfate Salts: an Experimental Study, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, no. 148, pp. 1-14. doi: 10.1007/s10973-023-12328-5
- 13. Preetha N., Muthu S., Thirupathy Dr. Optical and Thermophysical Properties of Copper Sulphate Pentahydrate Single Crystal for Transmission Ultra-Violet Filter and Optical Communication Applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, vol. 34, no. 11. doi: 10.1007/s10854-023-10358-1
- 14. Lidin R.A., Molochko V.A., Andreyeva L.L. *Khimicheskiye svoystva neorganicheskikh veshchestv* [Chemical properties of inorganic substances], Moscow: Khimiya, 2000, 480 p. (In Russ.)
- 15. Sytin A.V., Tyurin V.O., Mamontov F.A. [Application of the TableCurve 3D software package for approximating the thermophysical properties of neon in modeling lubrication processes in plain bearings], *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern materials, engineering and technology], 2015, no. 1(1), pp. 193-196. (In Russ., abstract in Eng.)
- 16. Deliiski N., Tumbarkova N. Applying the Software Package Table Curve 2D for Computation of Processing Air Medium Temperature During Freezing in a Freezer and Defrosring of Logs, *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design: International Conference Automatics and Informatics* (Sofia, Bulgaria, October 4 6, 2017), 2017, vol. 11, pp. 69-76.

17. Kuznetsov A.S. [Computer modeling of the kinetics of thermal oxidation of an elastomer composite in Tablecurve2D/3D programs], *Mezhdunarodnyy nauchnoissledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2018, no. 3(69), pp. 42-45. doi: 10.23670/IRJ.2018.69.027 (In Russ., abstract in Eng.)

#### Erhöhung der Genauigkeit der thermovolumetrischen Methode zur Analyse von Stoffen

Zusammenfassung: Als Ergebnis der durchgeführten Forschung ist eine Analyse der im thermovolumetrischen Messsystem ablaufenden Prozesse durchgeführt. Dabei sind die Einflussfunktionen des Volumens des Messbehälters, seines Füllungsgrades mit der zu untersuchenden Substanz und der Temperatur der Flüssigkeit im Sprudelbehälter und Temperatur im Messbehälter auf den systematischen Fehler bei der Messung des freigesetzten Gasvolumens ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass der größte Einfluss auf den Gesamtfehler durch den Füllungsgrad des Messgefäßes mit der untersuchten Substanz ausgeübt wird. Es ist eine Abhängigkeit ermittelt, die den Einfluss des Volumens des Messbehälters, seines Füllungsgrades mit der zu untersuchenden Substanz, der Temperatur der Flüssigkeit im Blasenbehälter und der Temperatur im Messbehälter auf das Messergebnis des Volumens des freigesetzten Gases berücksichtigt, was es ermöglicht, die Genauigkeit der thermovolumetrischen Methode zur Analyse von Substanzen durch die Einführung einer Korrektur in das Messergebnis zu erhöhen.

#### Élévation de la précision de l'analyse thermovolumométrique des substances

**Résumé:** Les études menées ont permis d'analyser les processus qui se produisent dans le système de mesure thermovolumométrique. Sont déterminées les fonctions de l'influence du volume du récipient de mesure, du degré de remplissage de la substance à l'étude, de la température du liquide dans le récipient à bulles et de la température dans la cuve de mesure pour l'erreur systématique due à la mesure du volume de gaz émis, est évaluée la contribution de chacun d'elles dans l'erreur générale. Est démontré que l'effet le plus important sur l'erreur globale est le degré de remplissage de la cuve de mesure par la matière étudiée. On obtient une dépendance tenant compte de l'influence du volume de la capacité de mesure, du degré de remplissage de la substance à l'étude, de la température du liquide dans la cuve à bulles et de la température dans la cuve de mesure sur le résultat des mesures du volume de gaz émis, ce qui permet d'améliorer la précision de la méthode thermovolumométrique d'analyse des substances en introduisant une correction dans le résultat des mesures.

Авторы: Мордасов Денис Михайлович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; Шерстеникин Павел Александрович — студент; Харитонов Николай Александрович — аспирант кафедры «Материалы и технология»; Панченко Евгений Борисович — ассистент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.043-050

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ РЕЦЕПТУРНЫХ БЛАНКОВ № 148-1/y-88 и № 107-1/y

В. Г. Попов $^{1}\boxtimes$ , Н. В. Майстренко $^{1}$ , К. С. Сарафанникова $^{2}$ , Л. Н. Ермакова $^{2}$ 

Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», sapr.tstu@mail.ru (1); ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; OOO «Аптека 1» (2), Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** бланк № 148-1/у-88; бланк № 107-1/у; математическое моделирование; рецептурный бланк; фармацевтическая экспертиза.

Аннотация: Разработана математическая модель процесса фармацевтической экспертизы рецептурных бланков 148-1/у-88 и 107-1/у, соответствующая требованиям актуальных, регулирующих приказов Министерства здравоохранения № 1093 и 1094 от 24.11.2024 года. Данная модель подготовлена для внедрения в систему автоматической или автоматизированной фармацевтической экспертизы рецептов.

#### Введение

Согласно аналитическому отчету DSM Group за 2023 год, около 70 % препаратов в денежном эквиваленте относятся к рецептурным, а в упаковках их доля составляет 54 % [1]. Таким образом, каждый второй препарат, отпускаемый в Российской Федерации — рецептурный, а, следовательно, требует предъявления корректно заполненного рецептурного бланка для получения или изготовления лекарственной формы в фармацевтических или медицинских учреждениях.

Так, фармацевт, работающий с рецептурными препаратами, и в особенности с препаратами, подлежащими предметно-количественному учету (ПКУ), должен проводить надлежащую фармацевтическую экспертизу. Согласно части 1.1 ст. 14.4.2 КоАП РФ Нарушение законодательства об обращении лекарственных средств, «Нарушение установленных правил отпуска лекарственных препаратов, подлежащих предметно-количественному учету, выразившееся в отпуске указанных лекарственных препаратов без рецепта, если эти действия не содержат признаков уголовно наказуемого деяния, влечет наложение административного штрафа на должностных лиц в размере от десяти тысяч до двадцати тысяч рублей или дисквалификацию на срок от шести месяцев до одного года; на лиц, осуществляющих предпринимательскую деятельность без образования юридического лица, – от пятидесяти тысяч до ста тысяч рублей; на юридических лиц – от ста пятидесяти тысяч до двухсот тысяч рублей» [2].

Для пациентов точность проведения фармацевтической экспертизы является полезной. Так, в процессе экспертизы фармацевтом проводится проверка соответствия выписанных дозировок нормам максимальных разовой и суточной доз для действующих веществ и лекарственных форм, что может помочь избежать нежелательных передозировок. Важным параметром, оцениваемым в процессе экспер-

тизы, является проверка совместимости компонентов в случае предоставления рецепта на изготовление ЛС, а также совместимость между препаратами в случае предоставления нескольких рецептурных бланков или покупки разных препаратов в аптеке. Так, при несовместимости компонентов может быть изготовлен препарат с недостаточной или отсутствующей эффективностью, а при несовместимости препаратов в терапии могут происходить нежелательные изменения терапевтического эффекта, побочные эффекты различной степени тяжести.

Проведение полной и точной фармацевтической экспертизы может занимать длительное время, так как требует тщательного анализа реквизитов рецепта, времени для обращения к справочникам и инструкциям разных препаратов, возможной необходимости проведения расчетов стоимости лекарственной формы. Таким образом, для сокращения времени анализа рецептов и снижения числа ошибок при фармацевтической экспертизе эффективным вариантом было бы применение информационных технологий.

Для создания системы автоматизированной или автоматической экспертизы рецептурных бланков необходимо разработать математическую модель процесса, которая позволит формализовать задачу экспертизы рецептурных бланков и подготовить систему обработки считанного или внесенного вручную рецепта.

#### Постановка задачи

Алгоритм проведения фармацевтической экспертизы рецептурных бланков представляет собой последовательный набор правил и инструкций, необходимых для проверки соответствия заполнению рецептурного бланка, требованиям приказов Министерства здравоохранения [4, 6].

Во время фармацевтической экспертизы рецепта проводятся вспомогательные расчеты, необходимые для разных задач. Так, фармацевты проверяют соответствие выписанных дозировок максимальным разовым и суточным дозировкам для конкретного действующего вещества или ЛС. В случае если выписанный препарат входит в перечень ЛС, подлежащих предметно-количественному учету, рассчитывается норма отпуска на один рецептурный бланк. Если пациенту был выписан рецепт на экстемпоральное (аптечное) изготовление препарата, фармацевту необходимо провести таксировку (расчет) стоимости изготавливаемых лекарственных форм. Схема алгоритма представлена на рис 1.

*Цель работы* — разработка математической модели процесса фармацевтической экспертизы рецептурных бланков 148-1/y-88 и 107-1/y, отвечающей требованиям актуального законодательства. Допущением математической модели является принятие входных данных корректными.

#### Математическая модель

Первый этап фармацевтической экспертизы рецепта – проверка корректности номера формы и актуальности приказа в заполненном рецептурном бланке:

$$f_1(x_1, x_2) = \begin{cases} \text{False, если } (x_1 = 0) \lor (x_2 = \text{False}); \\ \text{True, если } (x_1 > 0) \land (x_2 = \text{True}), \end{cases}$$
 (1)

где

 $x_{\rm I} = \begin{cases} 2, \ {\rm ec} \, {\rm nu} \, {\rm форма} \, {\rm pe} \, {\rm qe} \, {\rm птурного} \, {\rm бланка} \, N\!\!\!_{\rm P} \, 107 \, \text{-} \, 1/y \, ; \\ 1, \ {\rm ec} \, {\rm nu} \, {\rm форма} \, {\rm pe} \, {\rm qe} \, {\rm птурного} \, {\rm бланка} \, N\!\!\!_{\rm P} \, 148 \, \text{-} \, 1/y \, \text{-} \, 88 \, ; \\ 0, \ {\rm ec} \, {\rm nu} \, {\rm форма} \, {\rm he} \, {\rm cootbetctbyet} \, {\rm hu} \, {\rm odhoй} \, {\rm u3} \, {\rm nepe} \, {\rm qucchehhax} \, {\rm balme} \, ; \\ x_2 = \begin{cases} {\rm True}, \, {\rm ec} \, {\rm nu} \, {\rm форма} \, {\rm cootbetctbyet} \, {\rm aktyaльhomy} \, {\rm npuka3y} \, {\rm M3} \, \, {\rm P\Phi} \, ; \\ {\rm False}, \, {\rm ec} \, {\rm nu} \, {\rm форма} \, {\rm he} \, \, {\rm cootbetctbyet} \, {\rm aktyaльhomy} \, {\rm npuka3y} \, {\rm M3} \, \, {\rm P\Phi} \, . \end{cases}$ 

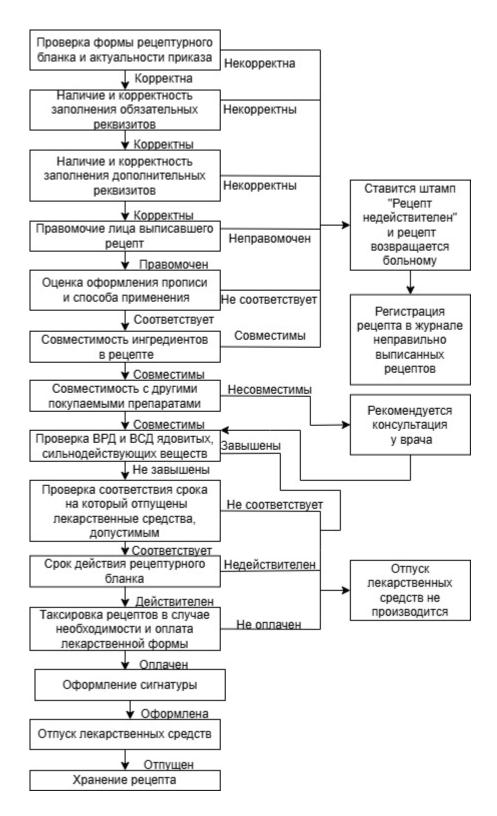


Рис. 1. Алгоритм проведения фармацевтической экспертизы рецепта

Далее определяется наличие обязательных реквизитов рецептурных бланков, к которым относятся: штамп лечебно-профилактического учреждения, дата выписки рецепта, Ф. И. О. пациента, возраст, Ф. И. О. врача, наименования ингредиентов, способ применения ЛС, личная подпись и печать врача [5]. Математически их можно представить как

$$f_2(X) = \bigwedge_{i=1}^n X_i, \tag{2}$$

n — количество обязательных реквизитов для данной формы рецептурного бланка.

Следующий этап фармацевтической экспертизы — определение наличия дополнительных реквизитов рецептурных бланков. В перечень данных реквизитов входят: печать для рецептов, круглая печать медицинской организации, номер и серия рецептурного бланка, номер амбулаторной карты или адрес пациента, метка специального назначения, подпись главного врача [5]:

$$f_3(X) = \bigwedge_{i=1}^n X_i \,, \tag{3}$$

где

 $X_i = \begin{cases} \text{True, } \text{ если } i\text{-}$ й реквизит имеется и требуется, не имеется и не требуется; } \\ \text{False, } \text{если } i\text{-}й реквизит требуется и не имеется, не требуется и имеется; }

n — количество возможных дополнительных реквизитов для данной формы рецептурного бланка.

В процессе экспертизы устанавливается правомочность лица выписывать содержащиеся в рецепте ЛС, а также возможность амбулаторно выписывать находящиеся в нем  $\Pi C$ 

$$f_{\Delta}(x) = x \,, \tag{4}$$

где

 $x = \begin{cases} \text{True, если лицо правомочно выписывать содержащиеся ЛС;} \\ \text{False, если лицо неправомочно и если запрещено выписывать такие ЛС.} \end{cases}$ 

На текущем этапе экспертизы проводится оценка соответствия оформления прописи и способа применения выписанных препаратов положению приказов [3, 5]

$$f_5(x) = x \,, \tag{5}$$

гле

 $x = \begin{cases} \text{True, если прописи и способ применения оформлены корректно;} \\ \text{False, если прописи и способ применения оформлены некорректно.} \end{cases}$ 

Следующий этап фармацевтической экспертизы рецепта – проверка совместимости компонентов прописи в рецепте

$$f_6(X) = \wedge X_{i,i}, \tag{6}$$

где X – матрица совместимости компонентов;

 $X_{i,j} = \begin{cases} {
m True, \,\, ecлu \,\, i\text{-} \Bar{u} \,\, u \, j\text{-} \Bar{u} \,\, компоненты \,\, полностью \,\, coвместимы;} \\ {
m False, \,\, ecлu \,\, i\text{-} \Bar{u} \,\, u \, j\text{-} \Bar{u} \,\, компоненты \,\, несовместимы.} \end{cases}$ 

Затем проводится проверка совместимости между разными препаратами, выписанными пациенту, а также другими покупаемыми пациентом препаратами

$$f_7(X) = \wedge X_{i,i}, \tag{7}$$

где X – матрица совместимости препаратов;

 $X_{i,j} = \begin{cases} ext{True, если } i$ -й и j-й препараты полностью совместимы; False, если i-й и j-й препараты несовместимы.

Далее проводится проверка выписанных разовых доз и суточного курса на соответствие высшим разовым дозам и высшим суточным дозам для ядовитых или сильнодействующих веществ.

Расчет отсутствия превышения высшей разовой дозы лекарственной формы

$$f_8(x_1, x_2) = \begin{cases} \text{True, } x_2 - x_1 \ge 0; \\ \text{False, } x_2 - x_1 < 0, \end{cases}$$
 (8)

где  $x_1$  – выписанная разовая доза вещества;  $x_2$  – максимальная разовая доза вещества.

Расчет отсутствия превышения высшей суточной дозы лекарственной формы:

$$f_9(x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} \text{True, } x_2 - x_1 x_3 \ge 0; \\ \text{False, } x_2 - x_1 x_3 < 0, \end{cases}$$
 (9)

где  $x_1$  –выписанная разовая доза вещества;  $x_2$  – максимальная суточная доза вещества;  $x_3$  – количество раз суточного приема.

Обобщение результатов

$$f_{10}(f_8, f_9) = f_8 \wedge f_9$$
. (10)

Следующий этап при проверке – проверка соответствия количества выписанных ЛС временным нормам для одного рецептурного бланка № 148-1/y-88:

$$f_{11}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \begin{cases} \text{True, если } \frac{x_3}{x_2 x_1} - x_4 \le 0; \\ \text{False, если } \frac{x_3}{x_2 x_1} - x_4 > 0, \end{cases}$$
 (11)

где  $x_1$  – выписанная разовая доза вещества;  $x_2$  – количество раз суточного приема;  $x_3$  – количество таблеток, выписанное врачом;  $x_4$  – нормы длительности курса для одного рецептурного бланка 148-1/у-88.

На данном этапе проводится расчет действительности рецептурного бланка:

$$f_{12}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \begin{cases} \text{True, если} (x_3 - (x_2 - x_1) > 0) \land (x_3 \le x_4); \\ \text{False, если} (x_3 - (x_2 - x_1) \le 0) \lor (x_3 > x_4), \end{cases}$$
 (12)

где  $x_1$  – дата выписки рецептурного бланка;  $x_2$  – дата отпуска лекарств по рецептурному бланку;  $x_3$  – указанный врачом срок действия рецепта;  $x_4$  – максимальный допустимый срок действия при выписанном типе назначения.

Далее экспертом проводится оформление сигнатуры. Данное действие представляет собой перенос некоторых основных и дополнительных реквизитов рецепта. К таким реквизитам относятся: адрес места, отпустившего ЛС по рецептурному бланку; номер и дата выписанного рецепта; Ф. И. О. и возраст лица, которому назначен препарат; номер амбулаторной карты или адрес места проживания лица, которому назначен препарат; Ф. И. О. лица, выписавшего рецепт, а также номер телефона этого лица или медицинской организации; содержание рецепта на латинском или русском языке; Ф. И. О. и подпись фармацевтического или

медицинского работника, отпустившего препарат; дата отпуска лекарственного препарата [3]:

$$Y = X (13)$$

где X — последовательность основных и дополнительных реквизитов, требуемых к заполнению в сигнатуре; Y — соответствующая последовательность реквизитов сигнатуры.

Далее, в случае если выписан рецепт на изготовление лекарственной формы лицом, проводящим фармацевтическую экспертизу, проводится расчет стоимости изготавливаемых лекарственных форм

$$f_{13}(X,M,n,N) = N\left(\sum_{i=1}^{n} X_i M_i + t + t_{\text{HH}}(n-1) + k_{\text{Bp}} + c\right), \tag{14}$$

где X— последовательность цен ингредиентов; M— последовательность масс ингредиентов; N— требуемое количество лекарственных форм для удовлетворения потребностей пациента; n— количество ингредиентов прописи; t— тариф на изготовление;  $t_{\rm uh}$ — дополнительный тариф на каждый ингредиент;  $k_{\rm Bp}$ — коэффициент при работе с ядовитыми или учетными веществами; c— стоимость тары.

Далее необходимо получить подтверждение оплаты лекарственной формы пациентом

$$f_{14}(x) = x \,, \tag{15}$$

гле

 $x = \begin{cases} \text{True - успешное завершение оплаты препарата;} \\ \text{False - отсутствие оплаты препарата.} \end{cases}$ 

Далее моделью проводится подсчет результатов покритериальной проверки и совершается отпуск  $\Pi C$ 

$$f = f_1 \wedge f_2 \wedge \dots \wedge f_7 \wedge f_{10} \wedge f_{11} \wedge f_{12} \wedge f_{13} \wedge f_{14}. \tag{16}$$

#### Заключение

Разработана математическая модель процесса фармацевтической экспертизы рецептурного бланка. Данной моделью учтены требования актуальных регулирующих отрасль приказов и практический опыт занимающихся экспертизой фармацевтов. Представленная модель в сочетании с подсистемой распознавания реквизитов рецептурного бланка и экспертной системой, содержащей данные для сверки, позволит разработать систему автоматизированной фармацевтической экспертизы, что в свою очередь поможет увеличить скорость и точность ее проведения, снижая количество ошибочно отпущенных препаратов и очередей в аптеках.

#### Список литературы

- 1. Шарапова И., Нечаева Ю., Шуляк С. Фармацевтический рынок России 2023 : аналитический отчет.— Текст : электрон. DSM Group, 2023. 130 с. URL : https://dsm.ru/docs/analytics/Annual\_report\_2023\_RUS\_.pdf (дата обращения: 16.01.2025).
- 2. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 № 63-Ф3 (ред. от 17.04.2017) // Собрание законодательства РФ. 2017. № 25. Ст. 2954.
- 3. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30 декабря 2001 г. № 195-ФЗ (КоАП РФ) (в ред. от 5 мая 2015 г.№10-П) // Собрание законодательства РФ. 2002 г. № 1 (часть I). Ст. 1.

- 4. Об утверждении Правил отпуска лекарственных препаратов для медицинского применения аптечными организациями, индивидуальными предпринимателями, имеющими лицензию на осуществление фармацевтической деятельности, медицинскими организациями, имеющими лицензию на осуществление фармацевтической деятельности, и их обособленными подразделениями (амбулаториями, фельдшерскими и фельдшерско-акушерскими пунктами, центрами (отделениями) общей врачебной (семейной) практики), расположенными в сельских поселениях, в которых отсутствуют аптечные организации, а также Правил отпуска наркотических средств и психотропных веществ, зарегистрированных в качестве лекарственных препаратов для медицинского применения, лекарственных препаратов для медицинского применения наркотические средства и психотропные вещества в том числе Порядка отпуска аптечными организациями иммунобиологических лекарственных препаратов : приказ от 24 ноября 2021 г. № 1093н. Текст : электрон. URL : https://normativ.kontur.ru/document? moduleId=1&documentId=408288 (дата обращения: 16.01.2025).
- 5. Фармацевтическая экспертиза рецепта : учеб. пособие для студентов медицинского факультета / И. А. Виноградова, Ю. П. Матвеева, В. Д. Юнаш, Т. А. Лотош, Ю. С. Кулатова, А. С. Лесонен. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. 77 с.
- 6. Об утверждении Порядка назначения лекарственных препаратов, форм рецептурных бланков на лекарственные препараты, Порядка оформления указанных бланков, их учета и хранения, форм бланков рецептов, содержащих назначение наркотических средств или психотропных веществ, Порядка их изготовления, распределения, регистрации, учета и хранения, а также Правил оформления бланков рецептов, в том числе в форме электронных документов (зарегистрировано в Минюсте России 30.11.2021 № 66124) : приказ Минздрава России от 24.11.2021 № 1094н. Текст : электрон. URL : https://normativ.kontur.ru/document? moduleId=1&documentId=408258 (дата обращения: 16.01.2025).

### A Mathematical Model of the Process of Pharmaceutical Expertise of Prescription Forms No. 148-1/y-88 and No. 107-1/y

V. G. Popov<sup>1⊠</sup>, N. V. Maistrenko<sup>1</sup>, K. S. Sarafannikova<sup>2</sup>, L. N. Ermakova<sup>2</sup>

Department of Automated Decision Support Systems, sapr.tstu@mail.ru (1); TSTU, Tambov, Russia; LLC Pharmacy 1 (2), Tambov, Russia

**Keywords:** form No. 148-1/y-88; form No. 107-1/y; mathematical modeling; prescription form; pharmaceutical expertise.

**Abstract:** A mathematical model of the process of pharmaceutical examination of prescription forms 148-1/u-88 and 107-1/u has been developed. The created mathematical model meets the requirements of the current regulatory orders of the Ministry of Health No. 1093 and 1094 dated November 24, 2024. This model has been prepared for implementation in the system of automatic or automated pharmaceutical examination of prescriptions.

#### References

1. available at: https://dsm.ru/docs/analytics/Annual\_report\_2023\_RUS\_.pdf (accessed 16 January 2025).

- 2. [The Criminal Code of the Russian Federation of June 13, 1996, No. 63-FZ (as amended on April 17, 2017)], *Sobranie zakonodateľ stva RF* [Collection of Legislation of the Russian Federation], 2017, no. 25, article 2954. (In Russ.)
- 3. [The Code of the Russian Federation on Administrative Offenses of December 30, 2001 no. 195-FZ (Administrative Code of the Russian Federation) (as amended on May 5, 2015 no. 10-P)], *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collection of Legislation Russian Federation], 2002, no 1 (part I), article 1. (In Russ.)
- 4. available at: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=408288 (accessed 16 January 2025).
- 5. Vinogradova I.A., Matveyeva Yu.P., Yunash V.D., Lotosh T.A., Kulatova Yu.S., Lesonen A.S. *Farmatsevticheskaya ekspertiza retsepta: ucheb. posobiye dlya studentov meditsinskogo fakul'teta* [Pharmaceutical examination of a prescription: a textbook for students of the medical faculty], Petrozavodsk: Izdatel'stvo PetrGU, 2013, 77 p. (In Russ.)
- 6. available at: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=408258 (accessed 16 January 2025).

#### Das mathematische Modell des Prozesses der pharmazeutischen Expertise der Rezeptformulare Nr. 148-1/u-88 und Nr. 107-1/u

**Zusammenfassung:** Es ist ein mathematisches Modell des Prozesses der pharmazeutischen Prüfung der Rezeptformulare 148-1/u-88 und 107-1/u entwickelt. Das erstellte mathematische Modell entspricht den Anforderungen der aktuellen Verordnungen des Gesundheitsministeriums Nr. 1093 und 1094 vom 24. November 2024. Dieses Modell ist für die Implementierung in das System zur automatischen bzw. automatisierten pharmazeutischen Überprüfung von Rezepten vorbereitet.

### Modèle mathématique du processus d'examen pharmaceutique des formulaires de prescription № 148-1 / y-88 et № 107-1 / y

**Résumé:** Est développé un modèle mathématique du processus d'examen pharmaceutique des formulaires de prescription 148-1/y-88 et 107-1/y. Le modèle mathématique créé répond aux exigences des règlements actuels du ministère de la santé № 1093 et 1094 du 24.11.2024. Ce modèle est préparé pour la mise en œuvre dans le système d'examen pharmaceutique automatique ou automatisé des prescriptions.

Авторы: Попов Вячеслав Геннадьевич — аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; Майстренко Наталья Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; Сарафанникова Кристина Сергеевна — заместитель заведующего аптечной организацией ООО «Аптека 1»; Ермакова Лариса Николаевна — заведующий аптечной организацией ООО «Аптека 1», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.051-058

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ СЛЕДЯЩЕГО ФИЛЬТРА С МОДЕЛЬЮ НА ОСНОВЕ ЗВЕНА ВТОРОГО ПОРЯДКА

#### Е. А. Антонов⊠, С. Н. Данилов

Кафедра «Радиотехника», е.а-nov98@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов. Россия

**Ключевые слова:** маневр; параметры фильтра; погрешность; производные; тестовый сигнал; фильтр; чувствительность.

Аннотация: Рассмотрена гипотеза о целесообразности применения в качестве модели движения объекта наблюдения модель на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка. Такой подход должен повысить точность оценки параметров движения объекта наблюдения. Для проверки гипотезы синтезирована математическая модель фильтра, основанного на алгоритмах марковской линейной фильтрации, с моделью на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка. На основе данной математической модели проведено исследование точности оценки расстояния и чувствительности фильтра к неточности соответствия параметров фильтра параметрам движения объекта наблюдения.

#### Постановка задачи

Чтобы обеспечивать экономию энергоресурсов, эффективность и безопасность использования воздушного пространства, существует единая система организации воздушного движения (ЕС ОрВД). На нее возлагается задача аэронавигационного обслуживания ВС, включающая оперативное предоставление экипажу в рамках управления воздушным движением (УВД) данных радиотехнических средств. Сюда же относится автономное использование на борту ВС инструментальных средств определения своего местоположения и средств посадки, а также использование каналов связи «борт-земля».

Основными источниками радиолокационной информации в данной системе являются радиолокационные станции (РЛС) и радиолокационные комплексы. Поэтому необходимо обеспечить высокую точность выходных данных с РЛС для корректной работы всей системы. В случае гражданской авиации более точные данные помогут снизить интервал времени нахождения в зоне ожидания, то есть повысить пропускную способность аэропортов.

Одними из основных факторов, негативно влияющих на точность получаемых данных, на сегодняшний день являются различного рода случайные составляющие вектора состояния цели ввиду воздействия некоторых внешних сил (порывы ветра, турбулентность и др.); маневренные свойства современных образцов летательных аппаратов (ЛА); малая эффективная площадь отражения (ЭПО) некоторых БПЛА. Перспективной областью решения данных проблем радиолокации является область оптимальных алгоритмов обработки информации.

Реальная траектория цели представляет собой непрерывную пространственно-временную функцию, которую можно аппроксимировать определенной систе-

мой уравнений, выражающих основные закономерности процесса движения цели. Поскольку движение целей совершается под воздействием многих сил и факторов, учесть которые полностью не представляется возможным, на практике применяются модели упрощенного типа.

#### Решение задачи

На практике наибольшее распространение в качестве модели движения цели получили альфа-бета и альфа-бета-гамма фильтры, а также упрощенные фильтры Калмана. Однако, как показывают исследования, траектории большинства лета-тельных аппаратов содержат существенную гармоническую составляющую [1]. В частности, спектральное представление изменения относительной дальности РЛС — цель для двух типичных траекторий (вираж — I и полет с проходом траверсы — 2) имеет вид, представленный на рис. 1, из которого видно наличие явной колебательной составляющей на частоте примерно 0,03 Гц. И это характерно для большинства типов маневров.

Поэтому представляется целесообразным применять в качестве модели движения цели модель в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -2\alpha x_2 - b^2 x_1. \end{cases}$$
 (1)

Перейдем к матричной форме записи. Выражение (1) будет иметь вид

$$\dot{X} = \mathbf{F} \times \mathbf{X}$$

где 
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$
;  $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b^2 & -2\alpha \end{bmatrix}$ .

Воспользовавшись обратным преобразованием Лапласа,

$$\Phi_{K+1/K} = L^{-1}(sI - F)^{-1}$$
,

получим переходную матрицу для дискретной модели:

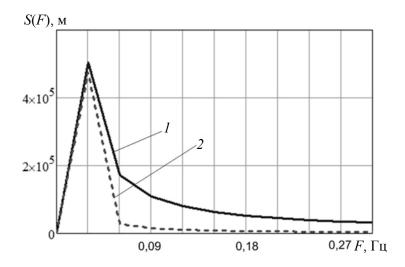


Рис. 1. Спектр изменения дальности для двух траекторий

$$E = \frac{e^{-\alpha t} \left(\cosh\left(t\sqrt{\alpha^2 - b^2}\right)\sqrt{\alpha^2 - b^2} + \alpha\sin\left(t\sqrt{\alpha^2 - b^2}\right)\right)}{\sqrt{\alpha^2 - b^2}};$$

$$F = -\frac{b^2 e^{-\alpha t} \sin\left(t\sqrt{\alpha^2 - b^2}\right)}{\sqrt{\alpha^2 - b^2}};$$

$$G = \frac{e^{-\alpha t} \sin\left(t\sqrt{\alpha^2 - b^2}\right)}{\sqrt{\alpha^2 - b^2}};$$

$$H = \frac{e^{-\alpha t} \left(\cosh\left(t\sqrt{\alpha^2 - b^2}\right)\sqrt{\alpha^2 - b^2} - \alpha\sin\left(t\sqrt{\alpha^2 - b^2}\right)\right)}{\sqrt{\alpha^2 - b^2}}.$$

Разлагая в ряд Тейлора составляющие полученной матрицы и отбросив все члены полученных рядов выше второго после несложных преобразований, получим переходную матрицу в компактном виде

$$\mathbf{\Phi}_{K+1/K} = \begin{bmatrix} (1-\alpha t) & (t-\alpha t^2) \\ -b^2(t-\alpha t^2) & (1-\alpha t) \end{bmatrix},\tag{2}$$

где  $\alpha$  и b – постоянные коэффициенты, характеризующие основную частоту звена и затухание (величина данных коэффициентов при моделировании оценивалась на основе усредненных спектров (см. рис. 1)).

Для проверки обоснованности данного утверждения разработаны две модели системы вторичной обработки данных [1-4]. Одна из них представляет собой классический фильтр Калмана, а вторая — фильтр с моделью на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка. Синтезированный фильтр включает матрицу  $\Phi_{K+1/K}$ , построен на основе алгоритмов марковской линейной фильтрации, а на вход поступает искаженная помехами информация с первичного измерителя дальности.

В качестве входных данных генерировался простой тестовый сигнал в дискретной форме следующего вида (рис. 2, сплошная кривая). Траектория имеет два характерных участка: участок медленного изменения оцениваемого параметра и участок резкого изменения ярко выраженного колебательного характера. Полученная на выходе фильтра оценка дальности до объекта показана пунктирной линией.

Оценка точности фильтра на основе исследуемой модели показала, что в условиях маневра среднеквадратическая величина (**СКВ**) погрешности значительно меньше, чем у обычного фильтра (более чем на порядок).

Для оценки чувствительности фильтра на основе этой модели к неточности соответствия параметров фильтра (коэффициенты  $\alpha$  и  $\sigma$ ) параметрам маневра проведен ряд исследований. На основе изменений коэффициентов  $\alpha$  и  $\sigma$ , при постоянной величине уровня шума наблюдения, получены два массива данных, характеризующие СКВ погрешности фильтра. Для сравнения, в начале получен массив данных для классического фильтра Калмана (табл. 1).

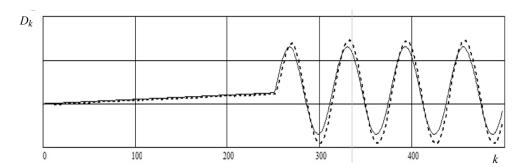


Рис. 2. Сигналы на входе и на выходе синтезированного фильтра

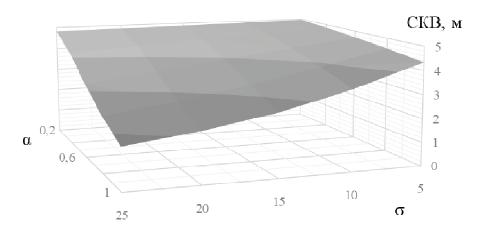
Таблица 1 Массив данных классического фильтра Калмана

α	σ					
	3	7	11	15	19	
0,1	4,975	4,917	4,88	4,848	4,817	
0,3	4,852	4,69	4,523	4,345	4,16	
0,5	4,721	4,35	3,949	3,558	3,202	
0,7	4,553	3,896	3,274	2,763	2,36	
0,9	4,342	3,397	2,654	2,131	1,76	

На рисунке 3 представлена графическая зависимость СКВ погрешности от величин α и σ, полученная на основе данного массива.

Как видно из результатов моделирования, СКВ погрешности зависит от изменяемых коэффициентов. Но чувствительность данной модели к изменениям коэффициентов α и σ весьма незначительна. Массив данных, полученный для модели на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка, представлен в табл. 2.

На основе данного массива также построен трехмерный график зависимости СКВ погрешности от  $\alpha$  и  $\sigma$  (рис. 4).



Puc. 3. Зависимость СКВ погрешности фильтра от коэффициентов  $\alpha$  и  $\sigma$ 

α	σ					
	3	7	11	15	19	
0,1	2,569	1,269	0,819	0,599	0,47	
0,3	0,579	0,242	0,157	0,123	0,106	
0,5	0,265	0,123	0,097	0,09	0,088	
0,7	0,163	0,095	0,088	0,088	0,089	
0,9	0,121	0,089	0,088	0,09	0,092	

Массив данных для синтезированного фильтра

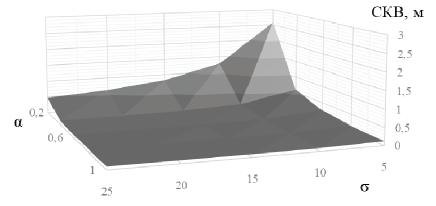


Рис. 4. Зависимость СКВ погрешности фильтра от коэффициентов α и σ для модели на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка

Как видно из результатов моделирования, СКВ погрешности обратно пропорционально зависит от изменяемых коэффициентов, причем изменение коэффициента α в большей степени влияет на выходной сигнал фильтра. Чувствительность данной модели к изменениям коэффициентов α и σ выше, чем у модели на основе классического фильтра Калмана [4 – 6], однако при определенных значениях коэффициентов такая модель позволяет добиться высокой точности оценки дальности до цели.

Более высокую точность оценки дальности фильтром на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка можно наблюдать на основе количественного показателя, который представляет собой отношение среднеарифметических значений СКВ погрешности двух фильтров при одном и том же уровне шума наблюдения. Таким образом, среднеарифметическое значение СКВ погрешности классического фильтра Калмана значительно больше, чем у фильтра с моделью на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка. Данный результат подтверждает гипотезу о целесообразности применения в качестве модели движения цели модель в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка, несмотря на его более высокую чувствительность к неточности настройки.

Кроме того, определены оценки чувствительности и при других значениях уровня шума наблюдения. Все полученные графики имеют характерную область условно постоянного значения СКВ погрешности при достижении коэффициентов а и о определенных значений. Величина данного условно постоянного значения СКВ погрешности напрямую зависит от максимального значения дисперсии шума наблюдения.

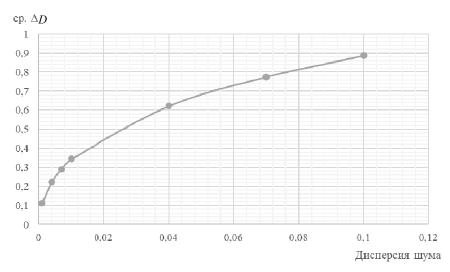


Рис. 5. Зависимость СКВ погрешности фильтра от дисперсии шума наблюдения

Для определения степени влияния дисперсии шума наблюдения на СКВ погрешности находилось нормированное среднеарифметическое значение СКВ погрешности (ср.  $\Delta D$ ) при различных значениях дисперсии шума наблюдения. График зависимости представлен на рис. 5.

#### Заключение

Основываясь на полученных результатах исследования, сделаны следующие выводы: применение в следящих фильтрах модели движения на основе системы дифференциальных уравнений второго порядка является целесообразным и позволяет повысить точность оценки параметров движения объекта наблюдения (в некоторых случаях СКВ погрешности оценки дальности до цели у синтезированного фильтра была в 11 раз меньше, чем у классического фильтра Калмана); синтезированный фильтр имеет более высокую (по сравнению с классическим фильтром Калмана) чувствительность к неточности соответствия параметров фильтра (коэффициенты  $\alpha$  и  $\sigma$ ) параметрам движения объекта наблюдения, что накладывает некоторые ограничения на применение подобных фильтров в следящих системах.

#### Список литературы

- 1. Льюнг, Л. О точности модели в идентификации систем / Л. Льюнг // Техническая кибернетика. -1992. -№ 6. C. 55 63.
- 2. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015, No. 3. Art. 032111. doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032111
- 3. Synthesis of Channel Tracking for Random Process Parameters under Discontinuous Variation / A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, S. N. Danilov, S. P. Moskvitin // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015, No. 3. Art. 032112. doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032112
- 4. Panasyuk, Yu. N. Synthesis of an Algorithm for Angle Measurement Channel of the Information-Measuring System of a Maneuvering Aircraft Given its Dynamic and Kinematic Characteristics / Yu. N. Panasyuk, A. P. Pudovkin, S. N. Danilov // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation

and Energy Efficiency (SUMMA). – 2019. – P. 73 – 76. doi: 10.1109/SUMMA48161. 2019.8947479

- 5. Иванов, А. В. Адаптивное оценивание и идентификация сигналов спутниковых радионавигационных систем в навигационных системах / А. В. Иванов, С. П. Москвитин, В. О. Сурков // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. − 2018. − Т. 24, № 1. − С. 44 − 57. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.044-057
- 6. Чернышова, Т. И. Информационная технология оценки метрологической надежности информационно-измерительных систем с учетом влияния внешних факторов / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов (Тамбов, 03 05 июня 2019 г.). Тамбов, 2019. С. 172–173.

### A Study of Sensitivity and Accuracy of Tracking Filter with Second-Order Link Model

E. A. Antonov<sup>⊠</sup>, S. N. Danilov

Department of Radio Engineering, e.a-nov98@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** maneuver; filter parameters; error; derivatives; test signal; filter; sensitivity.

**Abstract:** The article considers the hypothesis about the expediency of using a model based on a system of second-order differential equations as a model for the movement of an object of observation. Such an approach should increase the accuracy of estimating the movement parameters of the observed object. To test the hypothesis, a mathematical model of a filter based on Markov linear filtering algorithms was synthesized with model based on a system of second-order differential equations. On the basis of this mathematical model, a study was made of the accuracy of estimating the distance and the sensitivity of the filter to the inaccuracy of the correspondence of the filter parameters to the movement parameters of the object of observation.

#### References

- 1. Ljung L. [About model accuracy in system identification], *Tekhnicheskaya kibernetika* [Technical Cybernetics], 1992, no. 6, pp. 55-63. (In Russ., abstract in Eng.)
- 2. Pudovkin A.P., Panasyuk Yu.N., Danilov S.N., Moskvitin S.P. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 3, art. 032111, . doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032111
- 3. Pudovkin A.P., Panasyuk Yu. N., Danilov, S. N., Moskvitin, S. P. Synthesis of Channel Tracking for Random Process Parameters under Discontinuous Variation, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 3, art. 032112. doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032112
- 4. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Danilov S.N. Synthesis of an Algorithm for Angle Measurement Channel of the Information-Measuring System of a Maneuvering

Aircraft Given its Dynamic and Kinematic Characteristics, *1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency* (SUMMA), 2019, pp. 73-76. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947479

- 5. Ivanov A.V., Moskvitin S.P., Surkov V.O. [Adaptive estimation and identification of signals of satellite radio navigation systems in navigation systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 44-57. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.044-057 (In Russ., abstract in Eng.)
- 6. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Information technology for assessing the metrological reliability of information-measuring systems, taking into account the influence of external factors], *Energosberezheniye i effektiv-nost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Energy saving and efficiency in technical systems: Proc. VI Int. scientific and technical. conf. of students, young scientists and specialists] (Tambov, June 3-5, 2019), 2019, pp. 172-173. (In Russ.)

#### Untersuchung der Empfindlichkeit und Genauigkeit des Tracking-Filters mit einem Modell basierend auf Links zweiter Ordnung

**Zusammenfassung:** Es ist die Hypothese der Zweckmäßigkeit der Verwendung eines Modells auf der Grundlage des Systems von Differentialgleichungen zweiter Ordnung als Modell der Bewegung eines Beobachtungsobjekts untersucht. Dieser Ansatz sollte die Genauigkeit der Schätzung der Bewegungsparameter des Beobachtungsobjekts erhöhen. Um die Hypothese zu testen, war ein mathematisches Modell eines Filters auf der Grundlage von linearen Markov-Filteralgorithmen mit einem Modell auf der Grundlage des Systems von Differentialgleichungen zweiter Ordnung synthetisiert. Auf der Grundlage dieses mathematischen Modells sind die Genauigkeit der Entfernungsschätzung und die Empfindlichkeit des Filters gegenüber der Ungenauigkeit der Entsprechung der Filterparameter mit den Bewegungsparametern des Beobachtungsobjekts untersucht.

#### Étude de la sensibilité et de la précision du filtre témoin avec un modèle basé sur deuxième ordre

**Résumé:** Est examinée l'hypothèse de l'opportunité d'utiliser comme modèle le mouvement d'un objet d'observation le modèle basé sur un système d'équations différentielles du second ordre. Une telle approche devrait améliorer la précision des estimations des paramètres de mouvement de l'objet de la surveillance. Pour tester l'hypothèse, est synthétisé un modèle mathématique de filtre basé sur les algorithmes de filtrage linéaire de Markov avec un modèle basé sur un système d'équations différentielles du second ordre. A la base de ce modèle mathématique, est réalisée une étude sur la précision de l'estimation de la distance et de la sensibilité du filtre à l'inexactitude de la correspondance des paramètres du filtre avec les paramètres de déplacement de l'objet d'observation.

**Авторы:** *Антонов Евгений Андреевич* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.059-069

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

#### С. В. Фролов, Т. А. Фролова<sup>™</sup>, В. О. Лычагина, Д. Е. Судаков

Кафедра «Биомедицинская техника», frolova2000@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** аппроксимация; биотехническая система; динамические режимы; микроклиматические параметры; моделирование; позиционная система управления; программное управление.

Аннотация: Представлена система управления биотехнической системой для выращивания растений. Управление осуществляется на основе сложнопозиционной системы с отрицательной обратной связью и прямым программным управлением. Проанализированы динамические режимы работы биотехнической системы для выращивания растений (БТС-Р). Получены передаточные функции объекта и дано описание схемы сложнопозиционного регулирования микроклиматическими параметрами в БТС-Р. Проведено имитационное моделирование процесса управления в среде MATLAB Simulink с последующим анализом результатов.

#### Введение

Биотехнические системы (**БТС**) – особый класс технических систем, представляющих собой совокупность биологических и технических элементов, связанных между собой в едином контуре управления. Контур управления определяет и описывает границы регулирования работы объекта управления [1].

В работе [2] представлена новая группа БТС, отличающаяся по характеру целевой функции – биотехническая система для выращивания растений (БТС-Р). Изделие БТС-Р рассмотрено как инновационное устройство, которое объединяет в себе элементы автоматизации и методы оптимизации процесса выращивания растений. Система БТС-Р оснащена современной системой управления, которая контролирует и регулирует влажность, температуру, освещение и другие параметры, необходимые для роста и развития растений.

Управление разработанной БТС-Р основано на принципах отрицательной обратной связи и прямого управления.

#### Анализ существующих технических решений по управлению БТС-Р

Микроклиматическая среда в теплицах и тепличных комплексах — сложная динамическая система. К примеру, изменения температуры происходят быстро и варьируются в широких пределах в зависимости от температуры наружного воздуха и влажности, скорости и направления циркуляции воздуха, количества растительного материала в теплице, режима полива и др. Поэтому система управления должна в полной мере управлять микроклиматическими параметрами в теплицах.

Известен ряд подходов по реализации систем управления теплицами для выращивания растений. В работе [3] показана эффективность разработки автоматизированной системы управления в теплицах с прогнозированием возмущений. В исследовании [4] ученые представили надежную систему RL (обучение с подкреплением) для автономного управления теплицами, которая отвечает требованиям эффективности и безопасности отбора. Авторами [5] разработана система мониторинга влажности в теплице с применением искусственных нейронных сетей. Китайские ученые предложили интеллектуальную систему управления сельскохозяйственными теплицами на основе IoT (англ. Internet of Things (интернет вещей)) [6]. Техническим решением стала работа ученых из Ирана [7], которые спроектировали гидропонную теплицу с системой нечеткого управления. Авторы [8] разработали трехуровневое иерархическое управление, которое предназначено для обеспечения наилучшего синергетического эффекта при условии соблюдения требуемых климатических условий в теплице. Исследование [9] направлено на интеграцию ІоТ и солнечной энергии для мониторинга и управления теплицами. Использование фотоэлектрических модулей в данной системе позволяет повысить уровень самообеспечения и снизить производственные затраты. В работе [10] показан новый подход СЕР (англ. Complex Event Processing) к управлению, учитывающий уникальные характеристики теплиц. Предлагаемый метод потенциально может повысить точность и эффективность распознавания событий в теплицах. В статье [11] представлен проект комплексной системы управления для интеллектуальной теплицы на базе микроконтроллеров Mitsubishi. Система разработана с учетом конкретных требований к росту растений и состоит из двух основных компонентов: аппаратного и программного обеспечения. Авторы [12] предложили неклассический подход к управлению тепличным хозяйством на основе биоинспирированного алгоритма. В исследовании рассмотрено ПИД-управление и нечеткая логика в сочетании с биомиметической системой управления. Для решения проблем управления в работе [13] представлена стратегия поддержки принятия решений, позволяющая в режиме онлайн генерировать задающие воздействия для управления парниковым климатом. Данный подход использует многоцелевую оптимизацию в режиме реального времени для максимизации урожайности и минимизации энергопотребления, что приводит к оптимальным среднесуточным температурам на каждый день.

#### Структура системы управления в БТС-Р

Разработанное изделие БТС-Р представляет собой каркасную конструкцию, оснащенную датчиками и исполнительными устройствами, соединенными с контроллером [2]. Биотехническая система собрана на основе электронного конструктора Arduino. Для контроля за микроклиматическими параметрами используется пять различных датчиков: температуры почвы; влажности почвы, часы реального времени, температуры и влажности воздуха, уровня жидкости в емкости для полива. Для воздействия на микроклиматические параметры применяется несколько систем: лазерной досветки, искусственного освещения, проветривания, отопления и капельного полива.

Для управления параметрами микроклимата в БТС-Р используется метод позиционного регулирования и прямого управления. Структура системы управления представлена на рис. 1.

К входным параметрам БТС-Р относятся:  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  – параметры, управляющие соответственно нагревательным элементом, работой систем проветривания и капельного полива;  $x_4(t)$ ,  $x_5(t)$ ,  $x_6(t)$  – параметры, обеспечивающие

соответственно интенсивность освещенности, спектральный состав света, работу системы лазерной досветки.

Параметры  $x_1(t) - x_4(t)$  являются логическими переменными, принимающими значения 1, 0, что соответствует включению или выключению исполнительного элемента, например, нагревателя. Параметр  $x_5(t)$  — четырехзначная логическая переменная, принимающая значения 0, 1, 2, 3, каждое из которых соответствует определенному спектру света, а именно длине волны. При  $x_5(t) = 0$  светодиодная лента выключена; при  $x_5(t) = 1$  — лента излучает красный свет ( $\lambda \sim 650$  нм); при  $x_5(t) = 2$  — лента излучает свет в комбинации синего, зеленого и красного в соотношении 3:2:5 ( $\lambda \sim 570$  нм); при  $x_5(t) = 3$  — лента излучает свет в комбинации синего, красного и фиолетового в соотношении 2:5:3 ( $\lambda \sim 540$  нм).

К выходным параметрам БТС-Р относятся:  $y_1(t)$  – температура воздушного пространства, °C;  $y_2(t)$  – относительная влажность воздуха, %;  $y_3(t)$  – влажность почвы, усл. ед. изм. К возмущающим воздействиям БТС-Р относятся:  $z_1$  – температура окружающей среды (внешняя температура);  $z_2$  – влажность окружающей среды;  $z_3$  – метаболизм растений.

Температура и влажность воздуха, а также влажность почвы управляются с помощью позиционного регулятора с отрицательной обратной связью (ПР1, ПР2, ПР3), а интенсивность освещенности, спектр света и лазерная досветка – прямым программным управлением (ПрУ1, ПрУ2, ПрУ3).

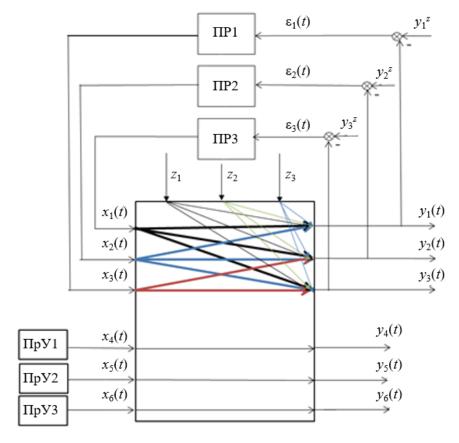


Рис. 1. Структурная схема системы управления в БТС-Р

### Получение экспериментальных динамических характеристик БТС-Р

Процесс идентификации объекта состоит их четырех основных этапов: планирования и подготовки эксперимента; его проведения; обработки результатов эксперимента, которая заключается в сглаживании полученной переходной характеристики и ее аппроксимации, формировании придаточной функции, и проверки адекватности полученной модели реальному объекту [14].

Цель идентификации – получение математического описания объекта в виде его передаточной функции на основе эксперимента.

Для проведения успешного эксперимента в БТС-Р проведена определенная подготовка, а именно определение входных, выходных параметров и неконтролируемых возмущающий воздействий и их зависимости друг от друга, а также разработан дополнительный режим работы БТС-Р, в котором испытатель может вручную изменить каждый микроклиматический параметр.

Суть эксперимента заключается в получении переходных характеристик по каналам:  $\langle x_1(t) - y_1(t) \rangle$ ,  $\langle x_1(t) - y_2(t) \rangle$ ,  $\langle x_1(t) - y_3(t) \rangle$ ,  $\langle x_2(t) - y_1(t) \rangle$ ,  $\langle x_2(t) - y_2(t) \rangle$ ,  $\langle x_2(t) - y_3(t) \rangle$ ,  $\langle x_3(t) - y_2(t) \rangle$ ,  $\langle x_3(t) - y_3(t) \rangle$ .

Единичными ступенчатыми воздействиями являлись включения нагревательного элемента  $x_1(t) = 1$ , актуатора (работа системы проветривания)  $x_2(t) = 1$ , системы полива (подача воды)  $x_3(t) = 1$ .

В диапазоне изменения значений входных и выходных параметров при проведении эксперимента принималось допущение о том, что исследуемая динамическая система является линейной и подчиняется принципу суперпозиции.

Эксперимент проводился при внешней температуре воздуха 24 °C и влажности воздуха 36 %.

Следующий этап – обработка результатов эксперимента, которая заключается в сглаживании полученной переходной характеристики и получении на ее основе переходной функции. Для этого выбрана методика аппроксимации [14]. Модель объекта может быть представлена в виде

$$W_{06}(S) = \frac{K_{06} e^{-\tau_{y} S}}{T_{yy} S + 1}.$$
 (1)

где  $T_{3K}$  — эквивалентное время.

Рассмотрим аппроксимацию переходной функции на примере графика изменения влажности почвы от времени проветривания. На вход подавалось скачкообразное воздействие величиной  $\Delta x_1 = 1$  (включение системы проветривания), на выходе была снята кривая разгона переходной функции y(t).

На рисунке 2 показана аппроксимация кривой разгона, которая представляет собой апериодическое звено 1-го порядка с запаздыванием [14]. Первый шаг – определение коэффициента усиления объекта  $K_{00}$  по формуле

$$K_{\text{of}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \,. \tag{2}$$

По графику определен прямолинейный участок кривой разгона [a;b], его середина c. Также из графика можно выделить время запаздывания, время до выхода кривой на насыщение, эквивалентное время.

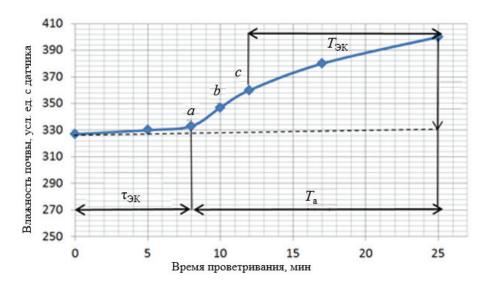


Рис. 2. Определение экспресс-методом коэффициентов расчетной модели объекта

Для получения модели объекта необходимо также найти большую  $T_{\rm 6}$  и малую  $T_{\rm M}$  постоянные времени и условное запаздывание  $\tau_{\rm V}$ :

$$T_{\rm M} = 0.105 T_{\rm a};$$
 
$$T_{\rm G} = T_{\rm 9K} - T_{\rm M};$$
 
$$\tau_{\rm y} = \tau_{\rm of} - T_{\rm M},$$
 (3)

где  $T_a$  – определяется из рис. 2.

Рассматриваемый график является звеном 1-го порядка с запаздыванием, соответственно  $\tau_{\rm V} > 0$ , тогда коэффициенты  $T_1$  и  $T_2$  определяются следующим образом:

$$T_1 = T_{9K};$$

$$T_2 = \tau_{V}.$$
(4)

Определив коэффициенты, можем записать передаточную функцию

$$W_{\text{of}}(S) = \frac{K_{\text{of}} e^{-\tau_{y} S}}{(T_{1}S + 1)(T_{2}S + 1)}.$$
 (5)

Переходную функцию, соответствующую передаточной, запишем в следующем в виде:

$$h(t) = K_{\text{of}} \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \Delta x .$$
 (6)

С использованием представленной методики по экспериментальным данным получены переходные характеристики с использованием среды MATLAB (рис. 3).

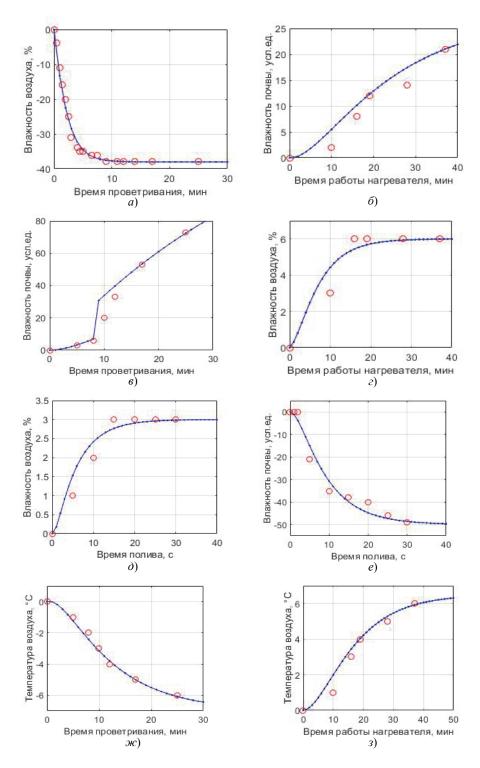


Рис. 3. Переходные характеристики по каналам:  $a-\ll x_2(t)-y_2(t) \text{»}; \ \delta-\ll x_1(t)-y_3(t) \text{»}; \ s-\ll x_2(t)-y_3(t) \text{»}; \ z-\ll x_1(t)-y_2(t) \text{»}; \ \partial-\ll x_3(t)-y_2(t) \text{»}; \ e-\ll x_3(t)-y_3(t) \text{»}; \ \mathscr{H}-\ll x_2(t)-y_1(t) \text{»}; \ 3-\ll x_1(t)-y_1(t) \text{»}$ 

#### Исследование разработанной системы управления в БТС-Р

Большое распространение для управления техническими средствами в биологии и медицине получили системы позиционного регулирования. В позиционных системах регулятор устанавливает регулирующее воздействие в одну или несколько фиксированных позиций: или сигнал управления имеет значение 1, или 0. Согласно количеству позиций регулятора, выделяют двухпозиционные, трехпозиционные и многопозиционные системы [15 – 17].

Управление микроклиматическими параметрами в БТС-Р осуществляется сложнопозиционной системой с тремя контурами. Внутри контура регулирование осуществляется через переключатель, имеющий только два значения: 0 — выключено, 1 — включено.

На рисунке 4 представлен многосвязный объект управления, соответствующий исследуемой БТС-Р. Передаточные функции  $W_{ji}$  получены из переходных характеристик (см. рис. 3) на основе использованной методики аппроксимации (2) – (6) и данных таблицы 1.

Имитационное моделирование процесса регулирование сложнопозиционной системы, выполненное в программной среде MATLAB Simulink, позволило создать модель БТС-Р и проанализировать ее поведение, а также сравнить модель с реальной работой системы. С помощью моделирования проанализировано взаимодействие влияния нагрева воздушных масс в комплексе с системами проветривания и капельного полива в БТС-Р.

В результате определены переходные процессы для каждого контура.

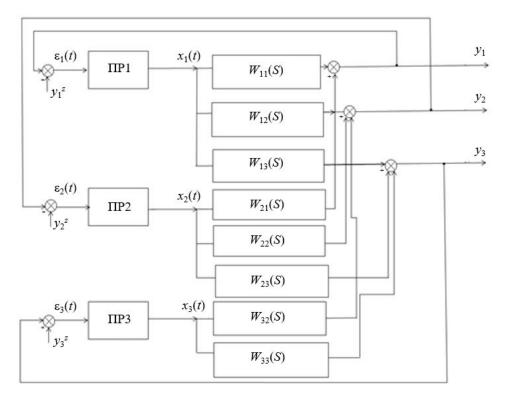


Рис. 4. Структурная схема сложнопозиционной системы управления:

 $\varepsilon$  – ошибка регулирования;  $y_3$  – задание;

x – регулирующее воздействие; y – выходной параметр;  $\Delta$  – зона возврата реле

Передаточные функции	$W_{ji}$
----------------------	----------

Индекс	Формула
11	$-6e^{-7,1653}$
	$W_{11}(S) = \frac{3C}{(11S-1)(7,165S-1)}$
12	$W_{12}(S) = $ 6
	$m_{12}(S) = \frac{1}{(3,635S-1)(1,365S-1)}$
13	21e <sup>-7,1653</sup>
	$W_{13}(S) = {(25S-1)(7,165S-1)}$
21	$W_{21}(S) =$
	(5,215S-1)(1,785S-1)
22	$W_{22}(S) = $ ——————————————————————————————————
	(5,555S-1)(0,945S-1)
23	$W_{23}(S) = \frac{60e^{-6,2155}}{}$
	$W_{23}(S) = {(11S-1)(7,165S-1)}$
32	$W_{32}(S) = $ 3
	(8,425S-1)(1,575S-1)
33	$-49e^{0,4153}$
	$W_{33}(S) = {(7,585S - 1)(2,415S - 1)}$

#### Заключение

Анализ результатов исследования динамических режимов БТС-Р показал корректную работу сложнопозиционной системы регулирования. Системой БТС-Р удается поддерживать заданные температуру воздуха, влажность воздуха, влажность почвы при условии взаимодействия входных и выходных параметров, что позволяет обеспечить быстрое и точное управление микроклиматическими параметрами. Успешная непрерывная эксплуатация разработанной БТС-Р в течение более шести месяцев подтвердила правильность предложенных технических решений и эффективность сложнопозиционной системы управления.

Исследование выполнено в рамках гранта на организацию акселерационных программ поддержки проектных команд и студенческих инициатив для формирования инновационных продуктов в рамках реализации федерального проекта «Платформы университетского технологического предпринимательства» государственной программы РФ «Научно-технологическое развитие РФ».

#### Список литературы

1. Биотехнические системы. Теория и проектирование: учеб. пособие / В. М. Ахутин, А. П. Немирко, Н. Н. Першин [и др.]. – Липецк: ЛГУ, 1981. – 220 с.

- 2. Биотехническая система для выращивания растений / С. В. Фролов, Т. А. Фролова, В. О. Лычагина [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. -2024. Т. 30, № 1. С. 85 94. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.085-094
- 3. Dudnyk, A. Automated Control System in Greenhouse With Neural Network Predictions of External Disturbances / A. Dudnyk // Energy and Automation. -2015. No. 1(23). P. 37-44.
- 5. Leekul, P. Development of humidity monitoring system in greenhouse with electromagnetic X band and artificial neural networks / P. Leekul, P. Wongsiritorn, P. Chaisaeng // Progress in Electromagnetics Research M. 2021. No. 100. P. 93 103. doi: 10.2528/PIERM20112202
- 6. Design of an Intelligent Management System for Agricultural Greenhouses Based on the Internet of Things / Z. Li, J. Wang, R. Higgs, L. Zhou, W. Yuan // IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Guangzhou, China, 2017. P. 154 160. doi: 10.1109/CSE-EUC.2017.212
- 7. Extraction of FAO Growth Model in a Fuzzy Control Hydroponic Greenhouse / A. Banakar, H. Khafajeh, S. Minaei, M. Delavar // ICROPM 2020: Second International Crop Modelling Symposium. Montpellier, France, 2020. URL: https://inria.hal.science/hal-02950327/document (дата обращения: 25.01.2025).
- 8. Multi-flow Optimization of a Greenhouse System: A Hierarchical Control Approach / P. C. Blaud, P. A. Haurant, P. Chevrel, F. Claveau, A. Mouraud // Applied Energy. 2023. Vol. 351. P. 121840. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121840
- 9. Hattarak1, S. A Solar-Powered IoT System to Monitor and Control Greenhouses-SPISMCG / S. Hattarak1, N. C. Jayashree // In book: Computational Intelligence for Engineering and Management Applications. -2023. -P. 457-471. doi: 10.1007/978-981-19-8493-8 35
- 10. Jia, Y. Complex Event Processing Methods for Greenhouse Control / Y. Jia, X. Li // Agriculture. 2021. Vol. 11, No. 9. P. 811. doi: 10.3390/agriculture11090811
- 11. Huang, M. Design of Intelligent Greenhouse Control System based on MCGS and PLC / M. Huang // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2510, No. 1. P. 012022. doi: 10.1088/1742-6596/2510/1/012022
- 12. Revathi, S. Enhancement in Smart Operation of Greenhouse Environment Using Intelligent Biomimetic Control Framework / S. Revathi, N. Sivakumaran, T. K. Hadhakrishnan // SN COMPUT. SCI. 2024. Vol. 5, No. 287. doi: 10.1007/s42979-024-02611-z
- 13. Su, Y. Setpoint Decision Support Strategy and Adaptive Hybrid Control of Greenhouse Climate: A Simulation Study / Y. Su, L. Xu // International Journal of Control Automation and Systems. 2022. Vol. 20, No. 1. doi: 10.1007/s12555-021-0638-3
- 14. Матвейкин, В. Г. Автоматизация технологических процессов и производств : лабор. работы / В. Г. Матвейкин, С. В. Фролов, А. В. Лагутин. Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-тет, 1995.-48 с.
- 15. Клюев, А. С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов : справ. пособие / А. С. Клюев, Б. В. Глазов, А. Х. Дубровский. 2-е изд. М. : Энергоатомиздат, 1990. 464 с.
- 16. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления : учеб. пособие / А. А. Первозванский. СПб. : Лань, 2015. 624 с.
- 17. Использование эффективных систем позиционного регулирования для задач медицинской техники / С. В. Фролов, К. С. Савинова, А. Ю. Куликов, И. А. Суконкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. -2022. -№ 2(42). C. 50 62. doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-4

#### Research on Dynamic Modes of Biotechnical System for Growing Plants

#### S. V. Frolov, T. A. Frolova, V. O. Lychagina, D. E. Sudakov

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

**Keywords:** approximation; biotechnical system; dynamic modes; microclimatic parameters; modeling; positional control system; program control.

**Abstract:** A control system for a biotechnical system for growing plants is presented. The control is carried out on the basis of a complex positional system with negative feedback and direct program control. The analysis of dynamic modes of operation of a biotechnical system for growing plants (BTS-R) is carried out. The transfer functions of the object are obtained and the scheme of complex regulation of microclimatic parameters in BTS-R is described. A simulation of the control process in the MATLAB Simulink environment was carried out, followed by an analysis of the results.

#### References

- 1. Akhutin V.M., Nemirko A.P., Pershin N.N. [et al.] *Biotekhnicheskiye sistemy*. *Teoriya i proyektirovaniye: uchebnoe posobiye* [Biotechnical Systems. Theory and Design], Lipetsk: Leningrad State University, 1981, 220 p. (In Russ.)
- 2. Frolov S.V., Frolova T.A., Lychagina V.O. [et al.] [Biotechnical system for growing plants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 85-94. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.085-094 (In Russ., abstract in Eng.)
- 3. Dudnyk A. Automated Control System in Greenhouse With Neural Network Predictions of External Disturbances, *Energy and Automation*, 2015, no. 1(23), pp. 37-44.
- 5. Leekul P., Wongsiritorn P., Chaisaeng P. Development of humidity monitoring system in greenhouse with electromagnetic X band and artificial neural networks, *Progress in Electromagnetics Research M.*, 2021, no. 100, pp. 93-103. doi: 10.2528/PIERM20112202
- 6. Li Z., Wang J., Higgs R., Zhou L., Yuan W. Design of an Intelligent Management System for Agricultural Greenhouses Based on the Internet of Things, *IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, Guangzhou, China, 2017, pp. 154-160. doi: 10.1109/CSE-EUC.2017.212
- 7. Banakar A., Khafajeh H., Minaei S., Delavar M. Extraction of FAO Growth Model in a Fuzzy Control Hydroponic Greenhouse, *ICROPM 2020: Second International Crop Modelling Symposium*, Montpellier, France, 2020, available at: https://inria.hal.science/hal-02950327/document (accessed 25 January 2025).
- 8. Blaud P.C., Haurant P.A., Chevrel P., Claveau F., Mouraud A. Multi-flow Optimization of a Greenhouse System: A Hierarchical Control Approach, *Applied Energy*, 2023, vol. 351, pp. 121840. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121840
- 9. Hattarak1 S., Jayashree N.C. A Solar-Powered IoT System to Monitor and Control Greenhouses-SPISMCG, In book: *Computational Intelligence for Engineering and Management Applications*, 2023, pp. 457-471. doi: 10.1007/978-981-19-8493-8\_35
- 10. Jia Y., Li X. Complex Event Processing Methods for Greenhouse Control, *Agriculture*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 811. doi: 10.3390/agriculture11090811
- 11. Huang M. Design of Intelligent Greenhouse Control System based on MCGS and PLC, *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2510, no. 1, pp. 012022. doi: 10.1088/1742-6596/2510/1/012022

- 12. Revathi S., Sivakumaran N., Hadhakrishnan T.K. Enhancement in Smart Operation of Greenhouse Environment Using Intelligent Biomimetic Control Framework, *SN COMPUT. SCI*, 2024, vol. 5, no. 287. doi: 10.1007/s42979-024-02611-z
- 13. Su Y., Xu L. Setpoint Decision Support Strategy and Adaptive Hybrid Control of Greenhouse Climate: A Simulation Study, *International Journal of Control Automation and Systems*, 2022, vol. 20, no. 1. doi: 10.1007/s12555-021-0638-3
- 14. Matveikin V.G., Frolov S.V., Lagutin A.V. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv: labor. raboty* [Automation of technological processes and production: laboratory work], Tambov: Tambov State Tech. University, 1995, 48 p. (In Russ.)
- 15. Klyuev A.S., Glazov B.V., Dubrovsky A.Kh. *Proyektirovaniye sistem avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov: sprav. posobiye* [Design of process automation systems: a reference guide], Moscow: Energoatomizdat, 1990, 464 p. (In Russ.)
- 16. Pervozvansky A.A. *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobiye* [Course of automatic control theory: textbook], St. Petersburg: Lan, 2015, 624 p. (In Russ.)
- 17. Frolov S.V., Savinova K.S., Kulikov A.Yu., Sukonkin I.A. [The use of effective positional control systems for medical technology tasks], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2022, no. 2(42), pp. 50-62. doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-4 (In Russ., abstract in Eng.)

### Untersuchung der dynamischen Modi des biotechnischen Systems für den Pflanzenanbau

Zusammenfassung: Es ist ein Steuerungssystem für das biotechnische System zur Pflanzenzucht vorgestellt. Die Steuerung basiert auf einem komplexen Positionssystem mit negativer Rückkopplung und direkter Programmsteuerung. Die dynamischen Betriebsarten des biotechnischen Systems für den Pflanzenanbau (BTS-R) sind analysiert. Die Übertragungsfunktionen des Objekts sind ermittelt und das Schema der komplexen Lageregelung der mikroklimatischen Parameter im BTS-R ist beschrieben. Es ist eine Simulationsmodellierung des Steuerungsprozesses in der MATLAB Simulink-Umgebung mit anschließender Analyse der Ergebnisse durchgeführt.

### Étude des modes dynamiques du système biotechnologique pour la croissance des plantes

**Résumé:** Est présenté le système de la gestion de la biotechnologie pour la culture de plantes. Le contrôle est effectué à la base d'un système de positionnement complexe avec une rétroaction négative et un contrôle de programme direct. Sont analysés les modes de fonctionnement dynamiques du système biotechnologique pour la culture de plantes (bssr). Sont obtenues les fonctions de transfert de l'objet; est décrit un schéma de régulation de position complexe avec des paramètres microclimatiques dans BTS-R. Est réalisée une simulation du processus de contrôle dans l'environnement MATLAB Simulink, suivie d'une analyse des résultats.

Авторы: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Фролова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», *Лычагина Виолета Олеговна* – студент, *Судаков Дмитрий Евгеньевич* – ассистент кафедры «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.070-080

# МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ПРОПУСКОВ НА ТЕРРИТОРИЮ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Ю. Ю. Калинина $^{1 \boxtimes}$ , Ю. А. Смирнова $^{1}$ , Р. Ю. Демина $^{2}$ 

Кафедры информационных технологий (1), jilietka@mail.ru; информационной безопасности (2), ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева», Астрахань, Россия

**Ключевые слова:** автоматизация; временный пропуск; интеллектуальная поддержка; комплексная безопасность университета; поддержка принятия решений; продукционные правила; продукционная система; система генерации пропусков; управление доступом.

Аннотация: Рассмотрены методика и алгоритм интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в контексте автоматизации процесса генерации временных пропусков на территорию высших учебных заведений. Акцентировано внимание на необходимости эффективной обработки заявок на получение временного пропуска на территорию университета в условиях увеличения числа посетителей и угроз безопасности. Дано описание ключевых концепций, таких как объекты и субъекты доступа, и их роль в управлении безопасностью. Предложена продукционная система, основанная на правилах доступа, которая формализует экспертные знания и автоматизирует принятие решений. Показаны преимущества внедрения системы поддержки принятия решений, включая повышение безопасности, эффективность процессов и улучшение пользовательского опыта.

#### Введение

Современные системы управления доступом на охраняемые территории сталкиваются с необходимостью оперативной обработки большого количества заявок на получение временных пропусков. Ручная обработка данных становится трудоемкой и неэффективной, особенно в условиях постоянно меняющейся ситуации и необходимости принятия быстрых управленческих решений. Необходимо прибегать к помощи методик и алгоритмов, обеспечивающих интеллектуальную поддержку принятия управленческих решений (ИППУР) для автоматизации и оптимизации процесса.

Интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений — это система и методы, которые обеспечивают сбор, обработку и анализ информации, позволяя эффективно принимать обоснованные решения в условиях неопределенности и сложных ситуаций. Главная цель ИППУР — повышение качества управленческих решений, снижение риска ошибок и улучшение общих результатов деятельности организации.

Система интеллектуальной поддержки представляет собой комплексное решение, включающее программное обеспечение и аппаратные средства, которые

совместно работают для автоматизации процесса выдачи временных пропусков. Рассматриваемые системы используют передовые технологии, такие как машинное обучение, искусственный интеллект, анализ больших данных и экспертные системы, для обеспечения эффективного и безопасного доступа на территорию университетов.

#### Участники правоотношений в информационных процессах

В контексте информационных технологий и систем управления доступом понятия «объект доступа» и «субъект доступа» играют ключевую роль в обеспечении безопасности информации. Объект доступа – это любой ресурс, к которому может быть предоставлен доступ, например, файлы, базы данных, приложения или даже физические устройства. В рамках предметной области объектом доступа являются помещения, в которые будет осуществляться доступ по созданным пропускам.

Субъект доступа, в свою очередь, представляет собой пользователя или процесс, который пытается получить доступ к объекту. Субъектами могут быть как физические лица, так и автоматизированные системы, такие как программы или устройства. Важно отметить, что субъекты могут обладать различными уровнями прав и ролей, что определяет, какие действия они могут выполнять с объектами доступа. Например, один пользователь может иметь право только на посещения конкретной аудитории в университете, в то время как другой имеет возможность получить пропуск в каждое помещение корпуса.

Определение четких границ между субъектами и объектами доступа помогает реализовать эффективные механизмы контроля доступа — создание политик безопасности, а также использование технологий, таких как аутентификация и авторизация. Аутентификация подтверждает личность субъекта, а авторизация определяет, какие ресурсы и действия доступны данному субъекту. Таким образом, понимание и качественная реализация концепций объектов и субъектов доступа являются основой для построения надежной системы безопасности информации.

#### Проблемы существующего процесса создания пропусков

В работах [1, 2] рассматривался вопрос об актуальной проблеме в сфере создания временных попусков на территорию университета, а также описывался текущий порядок создания пропуска. Данное исследование привело к выводу о многообразии проблем в процессе создания пропуска на территорию высшего учебного заведения. На рисунке 1 представлена диаграмма Исикавы, акцентирующая внимание на существующих проблемах в рассматриваемом процессе.

Данная диаграмма демонстрирует многообразие факторов и делится на несколько ключевых категорий. В первую очередь это проблемы процессов, включающие в себя недостатки, связанные с построенными цепочками действий. Так, ручная обработка заявок [3], которая является достаточно трудоемкой, значительно увеличивает вероятность ошибок и нарушает работу всего персонала. Технологические проблемы выражаются в использовании устаревших инструментов и отсутствии необходимых аналитических решений, тогда как недостаток автоматизации затрудняет оперативное принятие решений [4]. Существует также и ряд управленческих проблем, включая недостаточную осведомленность сотрудников, связанную с отсутствием централизованной точки сбора информации, и высокую вероятность ошибок, так как нельзя исключать человеческий фактор, когда сотрудники могут допускать неточности в работе. Внешняя среда также влияет на

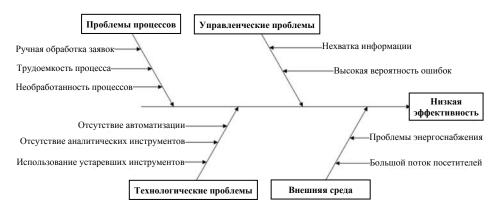


Рис. 1. Диаграмма Исикавы

эффективность формирования пропусков за счет большого потока посетителей, что может существенно снизить скорость обработки информации традиционным способом.

Кроме того, на все вышеперечисленные сложности накладываются воздействия со стороны внешней среды, такие как проблемы энергоснабжения, нередко вызывающие проблемы доступа к данным, или же увеличение потока посетителей, что подчеркивает необходимость не только дополнительной автоматизации, но и внедрения методик ИППУР, способных улучшить текущую ситуацию.

#### Формализация экспертных знаний и автоматизация процесса

Перед внедрением системы генерации пропусков важно рассмотреть процесс формализации знаний, связанных с управлением доступом. Систематизация информации о том, как обрабатываются заявки на получение пропусков, играет ключевую роль в обеспечении безопасности и упрощении взаимодействия между посетителями и организацией. Например, заявка на получение пропуска должна содержать такие данные, как ФИО заявителя, статус, цель визита, а также дату и время пребывания на территории. Это позволяет создать четкие критерии для оценки легитимности визита и помогает избежать потенциальных угроз. Для сотрудников и студентов университета процесс получения пропуска значительно упрощен, так как ввиду наличия информации в базе данных выдается автоматически. Однако для внешних посетителей необходимо провести более тщательную проверку. Важно убедиться, что цель визита является легитимной, соответствует запрашиваемому времени пребывания и не нарушает установленные ограничения доступа.

Если все условия выполнены, пропуск также выдается автоматически. В противном случае, заявка передается на рассмотрение ответственному сотруднику службы безопасности.

#### Создание продукционной системы для построения матрицы доступа

В контексте описанных проблем, внедрение систем ИППУР становится не просто желательным, а необходимым шагом для университетов, стремящихся обеспечить безопасность, эффективность и комфорт для всех своих участников и посетителей. Создание системы интеллектуальной поддержки строится на продукционной системе, состоящей из правил доступа на территорию учебного заведения [5]. Стоит отметить, что продукционное правило – формальное правило, состоящее из условия, выполнение которого влечет за собой какое-либо действие.

Продукционная система, в свою очередь, это множество продукционных правил, а также баз данных, на которые действуют заданные правила. Продукционные системы используются для принятия решений и работают по принципу «если – то», где система последовательно проверяет условия правил и применяет соответствующие действия.

На основании представленных формализованных экспертных знаний для предлагаемой методики ИППУР при создании временных пропусков необходимо построить продукционную систему, отражающую правила доступа на территорию университета.

```
іf as = = работник силовых структур → все объекты доступа; 

студент, 

ППС, участник мероприятия, 

АУП, посетители совещаний \longrightarrow столовая; 

іf as ∈ \begin{bmatrix} \text{студент}, \\ \Pi\Pi\text{С}, \text{посетитель совещания} \end{bmatrix} → [аудитории, лаборатории]; 

іf as ∈ [ППС, посетитель совещания, АУП] → [административные помещения, кабинеты проректоров]; 

іf as = = студент → общежитие; 

іf as ∈ \begin{bmatrix} \text{студент}, \Pi\Pi\text{C}, \\ \text{посетитель совещания}, \text{АУП} \end{bmatrix} → администрация факультета/кафедры; 

іf as = = АУП → [серверные, хозяйственные и инвентарные комнаты]; 

іf as ∈ [студент, ППС, АУП] → [компьютерные классы, касса, архив, мобилизационный отдел]; 

іf as = преподавательские комнаты; 

іf as ∈ [ППС, АУП] → [управление делами, отдел кадров, кабинет ректора],
```

где as — access subject, то есть субъект доступа;  $\Pi\Pi C$  — профессорско-преподавательский состав;  $AY\Pi$  — административно-управленческий персонал.

#### Матрица доступа как ключевой элемент системы

На основании продукционной системы возможно построить матрицу доступа, отражающую правила посещения охраняемой территории университета в матричном виде [6]. Матрица доступа — это таблица, определяющая возможность нахождения субъектов на территории разным объектам в компьютерной системе. Это фундаментальное понятие в области компьютерной безопасности и контроля доступа. Данная логистическая модель является важным компонентом любой системы контроля доступа, поскольку определяет отношения между пользователями, ресурсами и разрешениями. Создавая матрицу, важно отметить, что доступ к ресурсам университета предоставляется на основе заранее определенных правил, уменьшая риск несанкционированного доступа и улучшая общую безопасность [7]. В рамках исследуемой области построена матрица доступа, описывающая параметры доступа для создания временных и разовых пропусков для каждого статуса посетителей университета (табл. 1).

Для успешной реализации методики ИППУР при создании временных пропусков необходимо создать две ключевые базы: базу данных и базу правил. База

Матрица доступа в помещения университета

	Субъекты доступа					
Объекты доступа	Студенты	Преподаватели	Участники мероприятий	Административно управленческий персонал	Посетители	Работники силовых структур
Аудитории	1	1	0	0	1	1
Лаборатории	1	1	0	0	1	1
Административные по- мещения	0	1	0	1	1	1
Общежития	1	0	0	0	0	1
Администрация факуль- тета/кафедры	1	1	0	1	1	1
Залы для мероприятий	1	1	1	1	1	1
Столовая	1	1	1	1	1	1
Спортивные секции	1	1	0	1	0	1
Серверные	0	0	0	1	0	1
Компьютерные классы	1	1	0	1	0	1
Преподавательские ком- наты	0	1	0	0	0	1
Управление делами	0	1	0	1	0	1
Отдел кадров	0	1	0	1	0	1
Kacca	1	1	0	1	0	1
Кабинет ректора	0	1	0	1	0	1
Кабинеты проректоров	0	1	0	1	1	1
Архив	1	1	0	1	0	1
Мобилизационные отдел	1	0	0	1	0	1
Хозяйственные и инвентарные комнаты	0	0	0	1	0	1

правил, то есть продукционная система, представленная выше, содержит исключительно набор правил, определяющих условия доступа для различных категорий пользователей [8]. База данных, в свою очередь, включает в себя информацию о всех субъектах доступа (студенты, преподаватели, сотрудники и внешние посетители), а также сведения о временных пропусках и истории заявок. Стоит отметить, что уже существует внутренняя база данных, содержащая информацию о штатных сотрудниках и студентах университета, что значительно упрощает сбор данных, за счет интеграции существующей базы с базой, предлагаемой в описанной методике. Эффективная база данных обеспечивает быструю и точную обработку запросов, а также хранение всей необходимой информации для анализа и отчетности.

Рассматриваемая методика управления доступом в университетах через внедрение системы генерации пропусков представляет собой новаторское решение, которое выделяется среди существующих подходов благодаря своей интеграции формализованных знаний. Она основывается на систематизации и формализации экспертных знаний в области управления доступом, что позволяет создать четкие и понятные правила для автоматизированной обработки заявок. Это обеспечивает высокую степень легитимности и обоснованности принимаемых решений. Автоматизация процесса обработки заявок также является ключевой особенностью системы. В отличие от традиционных методов, где заявки обрабатываются вручную, новая система использует продукционные правила, что значительно сокращает время ожидания для пользователей и снижает нагрузку на сотрудников службы безопасности. Гибкая матрица доступа, учитывающая различные категории пользователей и их права, позволяет более точно регулировать доступ к ресурсам университета, обеспечивая высокий уровень персонализации и адаптивности системы, что особенно актуально в условиях изменяющихся требований безопасности.

Методика предусматривает возможность интеграции с уже существующими базами данных университета, что оптимизирует процесс сбора информации о пользователях и упрощает реализацию системы. Это не только снижает затраты на внедрение, но и облегчает обучение персонала. Использование автоматизированной системы с четкими правилами доступа и матрицей значительно повышает уровень безопасности на территории университета, минимизируя риски несанкционированного доступа и обеспечивая контроль над передвижением пользователей.

Кроме того, внедрение системы предоставляет возможность собирать и анализировать данные о посещаемости и применении ресурсов, что может быть использовано для дальнейшего улучшения процессов управления доступом и планирования мероприятий [9]. Ориентированность на удобство пользователей также является важным аспектом предлагаемой методики, что выражается в упрощении процесса получения пропусков для студентов и сотрудников, а также в создании понятного интерфейса для внешних посетителей.

Таким образом, новизна предложенной методики заключается в создании комплексной, автоматизированной и адаптивной системы управления доступом, которая не только повышает уровень безопасности, но и улучшает взаимодействие между всеми участниками образовательного процесса.

Алгоритм принятия решений, основанный на правилах и логике, позволит формализовать опыт специалистов службы безопасности в виде набора правил, которые будут автоматически применяться при обработке заявок, что повысит скорость, последовательность и обоснованность принимаемых решений.

#### Внедрение системы интеллектуальной поддержки в пропускной режим

Внедрение ИППУР в систему генерации пропусков имеет ряд преимуществ.

- *Повышение безопасности*. Система позволяет быстро идентифицировать потенциальные угрозы и предотвращать несанкционированный доступ.
- Эффективность процессов. Автоматизация рутинных операций сокращает время на обработку заявок и уменьшает нагрузку на службу безопасности.
- Динамическая адаптация. Возможность быстрого обновления правил и алгоритмов в ответ на изменения внешней среды [10].
- *Улучшение пользовательского опыта*. Простота и удобство подачи заявок для всех категорий пользователей.
- *Соответствие нормативным требованиям*. Обеспечение соответствия законодательству в области защиты данных и конфиденциальности.

Актуальность рассматриваемой темы автоматизации процесса выдачи временных пропусков в системах управления доступом на территорию университетов и других охраняемых территорий обусловлена несколькими ключевыми факторами [11].

- Рост числа участников образовательного процесса и посетителей. Современные университеты привлекают большое количество студентов, преподавателей, исследователей и внешних посетителей, что увеличивает нагрузку на системы безопасности и требует более эффективных методов управления доступом.
- Необходимость обеспечения высокого уровня безопасности. В условиях возрастающих угроз безопасности, включая терроризм, вандализм и кражи, важно оперативно идентично управлять доступом на территорию, чтобы предотвратить потенциальные инциденты.
- Соответствие законодательным требованиям. Университеты должны соблюдать законодательство в области защиты данных (например, GDPR в Европейском Союзе) и обеспечивать конфиденциальность и целостность информации о посетителях.
- *Требования к оперативности и удобству*. В быстро меняющемся мире участники образовательного процесса ожидают мгновенного и беспрепятственного доступа к необходимым ресурсам и помещениям, что требует от систем управления доступом высокой степени автоматизации и гибкости.
- Снижение затрат и повышение эффективности. Автоматизация процесса выдачи пропусков позволяет снизить затраты на ручную обработку заявок и сократить время ожидания для посетителей, что способствует повышению общей производительности университета.
- Оптимизация работы службы безопасности. Интеллектуальная поддержка при принятии управленческих решений позволяет персоналу службы безопасности сосредоточиться на более важных и сложных аспектах обеспечения безопасности, а не на рутинной обработке заявок на пропуска.
- Повышение удовлетворенности посетителей. Улучшение качества и скорости процесса получения пропусков способствует положительному впечатлению об университете и повышает удовлетворенность всех участников образовательного процесса.

Применение методики, основанной на матрице доступа, и алгоритма ИППУР в системе генерации временных пропусков позволяет повысить скорость, последовательность и обоснованность процесса выдачи пропусков, а также обеспечить более эффективный контроль доступа на территорию университета [12]. Формализация экспертных знаний в виде правил позволяет автоматизировать рутинные операции и высвободить ресурсы службы безопасности для решения более сложных задач.

#### Заключение

Интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений в системе генерации временных пропусков на территорию высших учебных заведений позволяет значительно повысить уровень безопасности и удобства для всех участников образовательного процесса. Применение современных технологий, таких как машинное обучение и экспертные системы, обеспечивает эффективное управление доступом и оперативное реагирование на изменения внешней среды. Разработка и внедрение такой системы требует тщательного планирования, анализа и сотрудничества с различными заинтересованными сторонами, но в итоге приводит к созданию надежной и удобной среды для учебной и научной деятельности.

Системы интеллектуальной поддержки принятия решений в процессе выдачи временных пропусков являются важным шагом в улучшении безопасности образовательных учреждений. Такие системы позволяют не только автоматизировать и оптимизировать рутинные операции, но и значительно повысить уровень защищенности территории университетов, обеспечивая при этом комфорт и удобство для всех участников образовательного процесса.

- 1. Калинина, Ю. Ю. Разработка информационной системы автоматизации процесса создания временного пропуска на территорию Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева / Ю. Ю. Калинина // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф., Знаменск, 11–12 апреля 2024 г. Астрахань, 2024. С. 91 94.
- 2. Калинина, Ю. Ю. Современные технологии для безопасного обучения: пропускные системы и автоматизация контроля доступа в учебных заведениях / Ю. Ю. Калинина // Фундаментальные и прикладные проблемы получения новых материалов: исследования, инновации и технологии : материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф., Астрахань, 8 10 апреля 2024 г. Астрахань, 2024. С. 226 230.
- 3. Козлов, А. Е. Система контроля и управления доступом на предприятие: понятие, характеристика и основные требования / А. Е. Козлов // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. -2019. Т. 15, № 1. С. 42 47. doi: 10.25987/VSTU. 2019.15.1.006
- 4. Попов, А. Н. Создание Цифрового пункта пропуска как ключевой элемент экономической безопасности / А. Н. Попов // Интеллектуальный пункт пропуска в России и мире: компетентностный подход к созданию: сб. докл. Всерос. практ. конф., Санкт-Петербург, 10–11 февраля 2022 г. СПб., 2022. С. 10 11.
- 5. Разработка алгоритма интеллектуальной поддержки принятия решений на базе системного подхода / М. Б. Ермолаев, А. А. Хомякова, А. Д. Белова, Ю. А. Серкова // Известия высших учебных заведений. Серия: экономика, финансы и управление производством. − 2022. − № 1(51). − С. 138 − 146. doi: 10.6060/ivecofin.2022511.594
- 6. Жуков, А. В. Основы пропускного режима в воинской части / А. В. Жуков, В. В. Туровский // Экономика и социум. 2018. № 3(46). С. 260 266.
- 7. Энгель, Е. А. Модели и методы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений / Е. А. Энгель // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. -2011. -№ 4(37). C. 106 112.
- 8. Акулич, С. В. Основные этапы имитационного моделирования и их реализация в системе поддержки принятия решений / С. В. Акулич, И. П. Колеснева, А. А. Жук // Системный анализ и прикладная информатика. -2024. -№ 2. -C. 47 51. doi: 10.21122/2309-4923-2024-2-47-51
- 9. Бадиков, А. В. Системы контроля и управления доступом. Лабораторный практикум / А. В. Бадиков, П. В. Бондарев. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 128 с.
- 10. Никифорова, А. А. Перспективы развития систем поддержки принятия решений / А. А. Никифорова // E-SCIO. -2022. -№ 12(75). C. 85 90.
- 11. Об одной тенденции развития алгоритмов, реализуемых в системах поддержки принятия решений / О. В. Саяпин, О. В. Тиханычев, А. А. Безвесильная, С. В. Чискидов // Программные продукты и системы. -2023. -№ 3. C. 388 397. doi: 10.15827/0236-235X.143.388-397
- 12. Веретехина, С. В. Итерационное моделирование. Логическое упорядочение входных параметров системы поддержки принятия решений / С. В. Веретехина // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. -2023. -№ 4(114). С. 69 87. doi: 10.35330/1991-6639-2023-4-114-69-87

#### A Method and Algorithm of Intelligent Decision-Making Support System for Generation of Temporary Access Passes to the Territory of Higher Educational Institutions

Yu. Yu. Kalinina<sup>1⊠</sup>, Yu. A. Smirnova<sup>1</sup>, R. Yu. Demina<sup>2</sup>

Departments: Information Technologies (1), jilietka@mail.ru; Information Security (2), Astrakhan State University named after V. N. Tatishchev, Astrakhan, Russia

**Keywords:** automation; temporary pass; intellectual support; comprehensive university security; decision support; production rules; production system; pass generation system; access control.

**Abstract:** The article considers the methodology and algorithm of intelligent decision-making support in the context of automating the process of generating temporary access passes to the territory of higher education institutions. The focus is on the need for efficient processing of applications for temporary passes to the university territory in the context of an increase in the number of visitors and security threats. A description of key concepts, such as access objects and subjects, and their role in security management is given. A production system based on access rules is proposed that formalizes expert knowledge and automates decision-making. The advantages of implementing a decision support system are shown, including increased security, process efficiency, and improved user experience.

#### References

- 1. Kalinina Yu.Yu. *Problemy povysheniya effektivnosti nauchnoy raboty v oboronno-promyshlennom komplekse Rossii: materialy VII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Problems of increasing the efficiency of scientific work in the defense-industrial complex of Russia: Proc. of the VII All-Russian scientific-practical. conf.], Znamensk, 11-12 April 2024, Astrakhan', 2024, pp. 91-94. (In Russ.)
- 2. Kalinina Yu.Yu. Fundamental'nyye i prikladnyye problemy polucheniya novykh materialov: issledovaniya, innovatsii i tekhnologii: materialy XVIII Mezhdunar. nauch.prakt. konf. [Fundamental and applied problems of obtaining new materials: research, innovation and technology: Proc. of the XVIII Int. scientific-practical. conf.], Astrakhan', 8-10 April 2024, Astrakhan', 2024, pp. 226-230. (In Russ.)
- 3. Kozlov A.Ye. [Access control and management system for an enterprise: concept, characteristics and basic requirements], *Vestnik Voronezhskogo gos. tekhn. un-ta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2019, vol. 15, no. 1, pp. 42-47. doi: 10.25987/VSTU. 2019.15.1.006 (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Popov A.N. *Intellektual'nyy punkt propuska v Rossii i mire: kompetentnostnyy podkhod k sozdaniyu: sb. dokl. Vseros. prakt. konf.* [Intelligent Checkpoint in Russia and the World: Competence-Based Approach to Creation: Coll. Reports of the All-Russian Pract. conf.], St. Petersburg, 10-11 February 2022, St. Petersburg, 2022, pp. 10-11. (In Russ.)
- 5. Yermolayev M.B., Khomyakova A.A., Belova A.D., Serkova Yu.A. [Development of an algorithm for intelligent decision-making support based on

- a systems approach], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: ekonomika, finansy i upravleniye proizvodstvom* [News of higher educational institutions. Series: economics, finance and production management], 2022, no. 1(51), pp. 138-146. doi: 10.6060/ivecofin.2022511.594 (In Russ., abstract in Eng.)
- 6. Zhukov A.V., Turovskiy V.V. [Basics of the access control system in a military unit], *Ekonomika i sotsium* [Economy and society], 2018, no. 3(46), pp. 260-266. (In Russ., abstract in Eng.)
- 7. Engel' Ye.A. [Models and methods of intellectual support in making management decisions], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev], 2011, no. 4(37), pp. 106-112. (In Russ., abstract in Eng.)
- 8. Akulich S.B., Kolesneva I.P., Zhuk A.A. [Main stages of simulation modeling and their implementation in the decision support system], *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied informatics], 2024, no. 2, pp. 47-51. doi: 10.21122/2309-4923-2024-2-47-51 (In Russ., abstract in Eng.)
- 9. Badikov A.V., Bondarev P.V. *Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. Laboratornyy praktikum* [Access control and management systems. Laboratory practical training], Moscow: NIYAU MIFI, 2010, 128 p. (In Russ.)
- 10. Nikiforova A.A. [Prospects for the development of decision support systems], *E-SCIO*, 2022, no. 12(75), pp. 85-90. (In Russ., abstract in Eng.)
- 11. Sayapin O.V., Tikhanychev O.V., Bezvesil'naya A.A., Chiskidov S.V. [On one trend in the development of algorithms implemented in decision support systems], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2023, no. 3, pp. 388-397. doi: 10.15827/0236-235X.143.388-397 (In Russ., abstract in Eng.)
- 12. Veretekhina S.V. [Iterative modeling. Logical ordering of input parameters of a decision support system], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2023, no. 4(114), pp. 69-87. doi: 10.35330/1991-6639-2023-4-114-69-87 (In Russ., abstract in Eng.)

#### Methode und Algorithmus der intellektuellen Unterstützung bei Managemententscheidungen im System der Generierung von temporären Pässen für das Gebiet der Hochschuleinrichtungen

Zusammenfassung: Es sind die Methodik und der Algorithmus der intellektuellen Unterstützung von Managemententscheidungen im Zusammenhang mit der Automatisierung des Prozesses der Erstellung von befristeten Ausweisen für das Gebiet der Hochschuleinrichtungen betrachtet. Der Schwerpunkt liegt auf der Notwendigkeit einer effektiven Bearbeitung von Anträgen auf zeitlich befristete Ausweise für das Hochschulgelände unter den Bedingungen der steigenden Zahl von Sicherheitsbedrohungen. Es ist die Beschreibung solcher Besuchern und Schlüsselkonzepte wie Objekte und Subjekte des Zugangs und ihrer Rolle im Sicherheitsmanagement gegeben. Es ist ein auf Zugangsregeln basierendes Produktsystem vorgeschlagen, das Expertenwissen formalisiert die Entscheidungsfindung automatisiert. Die Vorteile der **Implementierung** Entscheidungsunterstützungssystems sind aufgezeigt, einschließlich der verbesserten Sicherheit, Prozesseffizienz und Benutzererfahrung.

# Méthodologie et algorithme de l'appui intellectuel à la prise de décision de gestion dans le système de génération de laissez-passer temporaires sur le territoire des établissements d'enseignement supérieur

**Résumé:** Sont examinés la méthodologie et l'algorithme de l'appui intellectuel à la prise de décision de gestion dans le contexte de l'automatisation du processus de génération de laissez-passer temporaires sur le territoire des établissements d'enseignement supérieur. L'accent est mis sur la nécessité de traiter efficacement les demandes de carte d'accès temporaire à l'Université, compte tenu de l'augmentation du nombre des visiteurs et des risques pour la sécurité. Sont décrits les concepts clés tels que les objets et les entités d'accès et leur rôle dans la gestion de la sécurité. Est proposé un système de production fondé sur des règles de droit, qui formalise l'expertise et automatise l'adoption des décisions. Sont présentés les avantages de la mise en place d'un système d'aide à la décision, notamment l'amélioration de la sécurité, l'efficacité des processus et l'amélioration de l'expérience utilisateur.

Авторы: *Калинина Юлия Юрьевна* — студент; *Смирнова Юлия Александровна* — старший преподаватель кафедры информационных технологий; *Демина Раиса Юрьевна* — кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева», Астрахань, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.081-090

# ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПРИБОРНОЙ ПРОДУКЦИИ

А. А. Русина<sup>1</sup>, Е. Г. Семенова<sup>2</sup>, В. М. Балашов<sup>3</sup>⊠

Кафедры: «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (1); «Информационные системы и программная инженерия» (2), ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Россия; АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс» (3), balashov ут@radar-mms.com; Санкт-Петербург, Россия

**Ключевые слова:** аэрогеофизическая приборная продукция (АПП); информационное обеспечение; информационные массивы; подготовка операторов АПП; электронный контент.

Аннотация: Дано обоснование роста эффективности аэрогеофизических работ. Приведены примеры форм реализации информационного обеспечения систем подготовки операторов аэрогеофизической приборной продукции (АПП) в учреждениях профессионального образования. Представлена возможность интеграции интерактивных электронных технических руководств на АПП как вариант методологического обеспечения подготовки операторов. Приведена классификация электронного контента, входящего в информационное обеспечение. Отмечена необходимость выполнения требований по обеспечению информационной безопасности вновь создаваемых электронных данных для информационных массивов.

#### Введение

Совершенствование аэрогеофизических технологий в последнее десятилетие привело к значительному росту объемов работ с их применением при поиске и разведке различных полезных ископаемых в России и за рубежом [1]. В числе главных факторов, обусловивших резкий рост эффективности аэрогеофизических работ, следует отметить [2, 3]:

- внедрение последних достижений микро- и наноэлектроники, прецизионной механики, лазерной техники в геофизическом приборостроении, что обеспечило возможность цифровой регистрации и обработки сигналов и позволило существенно увеличить помехозащищенность, чувствительность и разрешающую способность измерительных каналов [4];
- наращивание спутниковой группировки навигационной системы ГЛОНАСС и совершенствование навигационной аппаратуры потребителей, позволившее увеличить более чем на порядок точность плановой и высотной привязки результатов измерений [5];
- расширение комплекса аэрогеофизических методов: аэрогравиметрия, новые модификации электромагнитной (**ЭМ**) съемки, тепловая (инфракрасная (**ИК**)), газовая и аэрозольная съемки и др.;
- разработка и внедрение принципиально новых систем обработки и интерпретации геофизических данных, базирующихся на использовании современной высокопроизводительной вычислительной техники.

Произошедший технологический прорыв привел к тому, что аэрогеофизические методы стали успешно конкурировать с наземными аналогами по точности и пространственному разрешению, существенно превосходя их по производительности, экономической эффективности и другим параметрам, в том числе благодаря традиционным преимуществам аэрогеофизических методов исследований [4, 5]:

- высокой производительности возможности в короткое время покрывать значительные площади работ, в том числе и в труднодоступных территориях с неразвитой инфраструктурой;
- объемному характеру получаемой информации, связанному с возможностью выполнения съемок на разных высотных уровнях и совместной интерпретации аэро- и наземных данных [6, 7];
- возможности комплексирования методов при незначительном увеличении себестоимости работ (не более чем на 10 − 15 % на каждый дополнительный канал);
- минимальным техногенным нагрузкам на природную среду в процессе выполнения работ.

*Цель исследования* — оценка состояния и перспектив совершенствования информационного обеспечения (**ИО**) аэрогеофизической приборной продукции, используемой в составе средств авиационной робототехники.

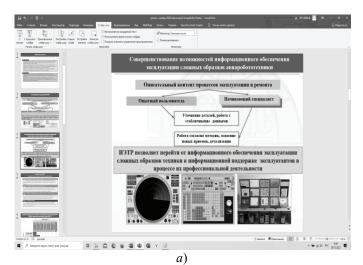
#### Формы реализации информационного обеспечения

Эффективность применения средств определяется прежде всего состоянием технической готовности аэрогеофизической приборной продукции (**АПП**), авиационного носителя и профессиональной подготовленностью операторов, управляющих этими роботизированными летательными аппаратами. В ряде работ [1-3] констатируется недостаточный уровень теоретической и практической подготовленности инженерно-технического состава для поддержания эксплуатационных характеристик АПП в условиях их интенсивного применения.

Процесс подготовки как операторов объектов роботизированной авиации, так и инженерного состава аэродромного, технического обслуживания средних и тяжелых беспилотных авиационных систем (БАС) базируется на первичном теоретическом освоении знаний и умений с их дальнейшим применением на практике. В современных условиях подготовки указанных категорий специалистов данный процесс основывается на широком использовании компьютерных систем автоматизации обучения и подготовки. Такие системы ориентированы на различные формы электронного представления предметного контента (компьютерные обучающие программы, интерактивные электронные учебники, компьютерные системы обучения и электронного тренажа, наборы лекционных презентаций и т.п.), далее по тексту понимаемые в своей совокупности, как «информационное обеспечение систем подготовки операторов АПП».

Примеры форм реализации информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП, нашедших широкое применение в учебных центрах дополнительного профессионального образования промышленных предприятий и учреждениях профессионального образования, приведены на рис. 1.

Наглядно лавинообразный рост объемов потребного высокотехнологичного информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП подтвержден на примере данных Центра практико-ориентированного образования и проектной деятельности Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» по оперативному удовлетворению потребностей университета в средствах информационного обеспечения подготовки специалистов по АПП, за счет привлечения разработчиков из подразделений самого учебного учреждения (кафедры «Информационные системы и программная инженерия», «Системы управления и компьютерные технологии»).



Hasherence CTanca

Hasherence CT

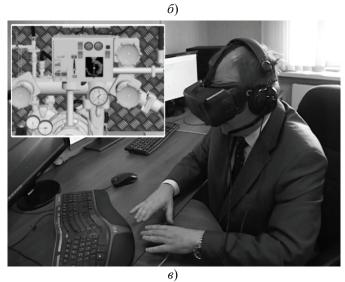


Рис. 1. Примеры форм реализации информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП (начало):

a – тематические презентации;  $\delta$  – компьютерные обучающие программы;  $\epsilon$  – комплексы интеллектуального тренажа



Рис. 1. Примеры форм реализации информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП (окончание):

г - комплексы предтренажерной подготовки

В этих условиях большая часть учебных заведений технического образования пошла по пути широкой интеграции интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) на АПП в соответствующие образцы информационного обеспечения подготовки операторов АПП. Такой методологический путь решения задачи быстрого и эффективного методического обеспечения подготовки операторов АПП позволяет обеспечить массированное получение ИЭТР для учебных мероприятий, в сочетании с оперативным учетом развития конструктивных и программных решений авиаробототехники.

#### Классификация электронного контента

Согласно нормативно-технической базы, а именно ГОСТ Р 54088–2010 и ГОСТ Р 50.1.030–2001 [8, 9], все множество электронного контента, входящего в информационное обеспечение подготовки операторов АПП, обобщенно классифицируют на пять основных классов.

Основаниями для такой классификации служат соответствующая базовая функциональность и связанная с этим цена программного исполнения. В порядке возрастания функциональных возможностей выделяют следующие классы:

1. Индексированные цифровые изображения страниц технической и эксплуатационной документации.

Интерактивные электронные технические руководства 1 класса представляют собой набор изображений, полученных сканированием страниц технической и эксплуатационной документации. Страницы индексированы в соответствии с содержанием, списками иллюстраций и таблиц и т.п. Индексация позволяет отобразить растровое представление необходимого раздела документации сразу после его выбора в содержании. Данный тип ИЭТР сохраняет ориентированность страниц и может быть выведен на печать без предварительной обработки.

Преимущества ИЭТР 1 класса: большие объемы бумажной документации заменяет компактный электронный носитель.

Недостатки ИЭТР 1 класса: не добавляет никаких новых функций по сравнению с бумажными руководствами.

2. Линейно-структурированные электронные документы..

Интерактивные электронные технические руководства 2 класса представляют собой совокупность текстов в формате SGML. Оглавление ИЭТР содержит ссылки на соответствующие разделы технического руководства, технической и экс-

плуатационной документации , которая может содержать перекрестные ссылки, таблицы, иллюстрации, ссылки на аудио- и видеоданные, предусматривается функция поиска данных. Интерактивные электронные технические руководства 2 класса могут быть просмотрены на экране и распечатаны без предварительной обработки.

Преимущества ИЭТР 2 класса: возможность использования аудио- и видеофрагментов, графических изображений и осуществления поиска по тексту документа

Недостатки ИЭТР 2 класса: ограниченные возможности обработки информации.

3. Иерархически-структурированные электронные документы и интерактивные базы данных.

В интерактивных электронных технических руководствах 3 класса данные хранятся как объекты внутри хранилища информации, имеющего иерархическую структуру.

Дублирование многократно используемых данных предотвращается системой ссылок на однократно описанные данные. Так как данные в ИЭТР 3 класса организованы иерархически, документация не может быть распечатана без предварительной обработки.

Преимущества ИЭТР 3 класса: возможность представления информации в различном виде при использовании многокритериальных выборок и поиска.

Недостатки ИЭТР 3 класса: при создании руководств к сложным промышленным изделиям появляются проблемы управления большим объемом информации.

4. Интегрированный ИЭТР.

В добавление к функциям ИЭТР класса 3, ИЭТР 4 класса обеспечивают возможность прямого интерфейсного взаимодействия с электронными модулями диагностики изделий.

Интерактивные электронные технические руководства класса 4 позволяют наиболее эффективно проводить операции по поиску неисправностей в изделии, локализации сбоев, подбору запасных частей.

Преимущества ИЭТР 4 класса: возможность проведения диагностики изделия. Недостатки ИЭТР 4 класса: очень высокая стоимость создания.

5. Интеллектуальные ИЭТР.

В добавление к функциям ИЭТР классов 3 и 4, ИЭТР 5 класса обеспечивают интеллектуально-компетентностную поддержку пользователя-эксплуатанта, а также интеллектуальный, индивидуализированный интерфейс пользователя. Интерактивные электронные технические руководства класса 5 позволяют наиболее эффективно проводить системную эксплуатацию высокосложных технических изделий и комплексов, предупреждать отказы и неисправности.

Они включают в себя средства накопления полученных в процессе эксплуатации технических данных, их анализа и формирования рекомендаций пользователям ЭК о предпочтительном порядке обслуживания АПП и диагностики неисправностей с использованием технологий искусственного интеллекта.

Преимущества ИЭТР 5 класса: возможность упреждающей диагностики и недопущение неисправностей (отказов) элементов изделия, высокую технологичность.

Недостатки ИЭТР 5 класса: сверхвысокая стоимость создания, необходимость формирования отдельной технической подсистемы контроля в составе изделия для обеспечения функционирования электронного контента [8, 9].

Примечание: ИЭТР 5 класса выделяют из общей массы программноинформационных продуктов этого вида только ГОСТ Р 54088–2010 [8], в отличии от ГОСТ Р 50.1.030–2001 [9], что не противоречит общей концепции классификации и вызвано исключительно фактами некоторого объективного устаревания нормативно-технических документов по информационным технологиям поддержки жизненного цикла продукции. При этом применение программно-информационных технологий искусственного интеллекта и, в частности, программных технологий виртуальной и дополненной реальности, в различных системах подготовки операторов АПП предъявляет принципиально более сложные требования к информационному обеспечению, представлению контента предметной области в цифровом виде.

Перспективность применения электронного контента для ускоренного синтеза средств информационного обеспечения подготовки операторов АПП определяется в не меньшей степени и необходимостью выполнения требований по обеспечению информационной безопасности вновь создаваемых электронных данных для информационных массивов, используемых при решении задач и содержащих сведения о реальной или перспективной обстановке.

Исходя из основных принципов защиты информации, требования по обеспечению безопасности информации, используемой при синтезе средств информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП, традиционно принято разбивать на следующие группы требований к средствам защиты информации:

- составу таких средств;
- техническим компонентам;
- программным средствам защиты данных;
- организационным мероприятиям.

В состав системы защиты данных средств информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП за счет интеграции в них ИЭТР должны входить программно-аппаратные и организационные средства защиты. В настоящее время интеграция ИЭТР в информационное обеспечение систем подготовки операторов АПП носит в целом эмпирический характер. Практически не учитывается то обстоятельство, что структура и содержание ИЭТР отражают систему требований нормативно-технических документов (ГОСТы, технические регламенты, инструкции, методические указания и пр.) к технической и эксплуатационной документации на АПП, но никак не учитывают дидактический аспект усвоения материала. Интерактивные электронные технические руководства изначально ориентированы на технически-грамотного и подготовленного потребителя, не учитывают необходимость междисциплинарного характера базовой подготовки операторов и т.д.

Анализ ряда работ [10 – 12] по вопросам гармонизации, интеграции и слияния информации, фундаментальных разработок в области проектирования и создания программно-информационного обеспечения процессов подготовки специалистов [13 – 15], а также проведенного специализированного исследования [16, 17]



Рис. 2. Результаты сравнения возможностей ИЭТР и средств информационного обеспечения подготовки операторов АПП

наглядно показывает, что изначально интерактивные электронные технические руководства не реализуют всю совокупность требований, предъявляемых к средствам ИО систем подготовки операторов АПП.

В частности, ИЭТР не учитывает дидактические, интерфейсно-интерактивные и логико-эдукологические групп требований, не в полной мере учитывают специфические эргономические и контекстно-смысловые требования (рис. 2).

#### Заключение

Таким образом, при всех очевидных достоинствах решения задачи быстрого и всесторонего обеспечения процесса подготовки операторов АПП качественными средствами информационного обеспечения для формирования соответствующих знаний и первичных умений, навыков, за счет эффективного использования ранее разработанного контента для указанных изделий, существуют объективные риски неэффективности такого решения. К ним относятся снижение качества информационного обеспечения систем подготовки операторов АПП от интеграции в их состав ИЭТР, в силу изначальной неориентированности его на специфику процесса подготовки операторов АПП. Однако такие риски могут быть выявлены, оценены, а также локализованы и хеджированы.

#### Список литературы

- 1. Лаптев, В. В. Российский геофизический рынок / В. В. Лаптев // Геофизический вестник. -2016. -№ 4. -C. 4-8.
- 2. Никитин, А. А. Детерминированность и вероятность в обработке и интерпретации геофизических данных / А. А. Никитин // Геофизика. 2004. № 3. С. 10-16.
- 3. Бычков, С. Г. Эволюция программно-алгоритмического обеспечения обработки и интерпретации гравиметрических материалов / С. Г. Бычков, А. А. Симонов // Горное эхо. Вестник Горного института. 2007. № 2(28). С. 38 42.
- 4. Кирсанов, В. Н. Современные аэрогеофизические комплексы и перспективы их развития / В. Н. Кирсанов, В. В. Филимонов // Разведка и охрана недр. -2003. № 4. С. 20-23.
- 5. Ессин, С. С. Выбор параметров аэрофотосъемки для картографирования с БПЛА. Текст: электрон. / С. С. Ессин, А. С. Костюк // Земельный вестник Московской области. 2012. № 7. URL: http://zemvest.ru/jurnal/arhiv-jurnala/7-2012/11/ (дата обращения: 25.02.2025).
- 6. Костюк, А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА / А. С. Костюк // Гео-Сибирь. 2010. Т. 4, № 1. С. 83 87.
- 7. Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок. Текст: электрон. / Ю. В. Асламов, П. С. Бабаянц, Н. А. Глинский, Е. И. Зубов, П. В. Мельников. СПб. : Картографическая фабрика ФГБУ ВСЕГЕИ, 2021. 42 с. URL : https://karpinskyinstitute.ru/ru/about/nrs/gphs/met\_rec-aero.pdf (дата обращения: 25.02.2025).
- 8. ГОСТ Р 50.1.030–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Интерактивные электронные технические руководства. Требования к логической структуре базы данных. Введ. 2002-07-01. М.: Госстандарт России, 2001. 32 с.
- 9. ГОСТ Р 54088–2010. Интегрированная логистическая поддержка. Интерактивные электронные эксплуатационные и ремонтные документы. Основные положения и общие требования. Введ. 2011-09-01. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.
- 10. Ивакин, Я. А. Оптимизированный алгоритм статистической проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга / Я. А. Ивакин,

- С. Н. Потапычев, Р. Я. Ивакин // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, N 1. С. 86 93.
- 11. Барский, А. Б. SPMD-архитектура и параллельная обработка структур данных. Текст: электрон. / А. Б. Барский, В. В. Шилов // Инженерное образование. 2006. № 2. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary\_9440936\_73817880.pdf (дата обращения: 25.02.2025).
- 12. Оборонная наука экономике России / под ред. Ю. И. Борисова. М. : Оружие и технологии, 2021. 760 с.
- 13. Печников, А. Н. Теоретические основы психолого-педагогического проектирования автоматизированных обучающих систем: монография / А. Н. Печников. Петродворец: Изд-во ВВМУРЭ им. А. С. Попова, 1995. 322 с.
- 14. Горский, Ю. М. Информационные аспекты управления и моделирования / Ю. М. Горский. М. : Наука, 1995. 264 с.
- 15. Ивакин, Я. А. Методы интеллектуализации промышленных геоинформационных систем для диспетчеризации пространственных процессов : монография / Я. А. Ивакин ; под ред. Р. М. Юсупова. СПб. : Изд-во СПИИРАН, 2010. 239 с.
- 16. Перова, В. И. Нейросетевое моделирование динамики инновационной деятельности в регионах Российской Федерации / В. И. Перова, Е. И. Ласточкина // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. 2015. Вып. 3. С. 49 58.
- 17. Deboeck, G. Visual Exploration in Finance with Self-Organizing Maps / G. Deboeck, T. Kohonen. Springer-Verlag, 2013. 258 p.

### Information Support of Training Systems for Operators of Aerogeophysical Instrument Products

A. A. Rusina<sup>1</sup>, E. G. Semenova<sup>2</sup>, V. M. Balashov<sup>3</sup>

Departments: Engines and Power Plants of Aircraft (1); Information Systems and Software Engineering (2), Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russia; "Radar mms" Scientific and Production Enterprise" JSC (3), balashov vm@radar-mms.com; St. Petersburg, Russia

**Keywords:** aerogeophysical instrument products; information arrays; information support; operators' training; electronic content.

**Abstract:** The article provides a justification for the growth of aerogeophysical works efficiency. Examples of forms of information support systems implementation for the training of aerogeophysical instrument products operators in vocational education institutions are given. The possibility of interactive electronic technical manuals integration in the aerogeophysical instrument products as a variant of methodological support for operators' training is presented. The classification of the electronic content included in the information support is given. It is noted that it is necessary to meet the requirements for ensuring the information security of newly created electronic data for information arrays.

#### References

- 1. Laptev V.V. [Russian geophysical market], *Geofizicheskiy vestnik* [Geophysical Bulletin], 2016, no. 4, pp. 4-8. (In Russ., abstract in Eng.)
- 2. Nikitin A.A. [Determinism and probability in processing and interpretation of geophysical data], *Geofizika* [Geophysics], 2004, no. 3, pp. 10-16. (In Russ., abstract in Eng.)

- 3. Bychkov S.G., Simonov A.A. [Evolution of software and algorithmic support for processing and interpretation of gravimetric materials], *Gornoye ekho. Vestnik Gornogo instituta* [Mining echo. Bulletin of the Mining Institute], 2007, no. 2(28), pp. 38-42. (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Kirsanov V.N., Filimonov V.V. [Modern aerogeophysical complexes and prospects for their development], *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], 2003, no. 4, pp. 20-23. (In Russ., abstract in Eng.)
- 5. Available at: http://zemvest.ru/jurnal/arhiv-jurnala/7-2012/11/ (accessed 25 February 2025).
- 6. Kostyuk A.S. [Calculation of parameters and assessment of the quality of aerial photography with UAVs], *Geo-Sibir'* [Geo-Siberia], 2010, vol. 4, no. 1, pp. 83-87. (In Russ., abstract in Eng.)
- 7. Available at: https://karpinskyinstitute.ru/ru/about/nrs/gphs/met\_rec-aero.pdf (accessed 25 February 2025).
- 8. GOST R 50.1.030-2001. Informatsionnyye tekhnologii podderzhki zhiz-nennogo tsikla produktsii. Interaktivnyye elektronnyye tekhnicheskiye rukovodstva. Trebovaniya k logicheskoy strukture bazy dannykh [Information technologies for product life cycle support. Interactive electronic technical manuals. Requirements for the logical structure of the database], Moscow: Gosstandart Rossii, 2001, 32 p. (In Russ.)
- 9. GOST R 54088-2010. Integrirovannaya logisticheskaya podderzhka. Interaktivnyye elektronnyye ekspluatatsionnyye i remontnyye dokumenty. Osnovnyye polozheniya i obshchiye trebovaniya [Integrated logistics support. Interactive electronic operational and repair documents. Basic provisions and general requirements], Moscow: Standartinform, 2013, 30 p. (In Russ.)
- 10. Ivakin Ya.A., Potapychev S.N., Ivakin R.Ya. [Optimized algorithm for statistical testing of hypotheses of retrospective studies based on geochronotracking], *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of educational institutions of communication], 2020, vol. 6, no. 1, pp. 86-93. (In Russ., abstract in Eng.)
- 11. Barskiy A.B., Shilov V.V. [SPMD architecture and parallel processing of data structures], *Inzhenernoye obrazovaniye* [Engineering education], 2006, no. 2, available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary\_9440936\_73817880.pdf (accessed 25 February 2025).
- 12. Borisov Yu.I. (Ed.). *Oboronnaya nauka ekonomike Rossii* [Defense science for the economy of Russia], Moscow: Oruzhiye i tekhnologii, 2021, 760 p. (In Russ.)
- 13. Pechnikov A.N. *Teoreticheskiye osnovy psikhologo-pedagogicheskogo proyektirovaniya avtomatizirovannykh obuchayushchikh sistem: monografiya* [Theoretical Foundations of Psychological and Pedagogical Design of Automated Training Systems: monograph], Petrodvorets: Izdatel'stvo VVMURE im. A. S. Popova, 1995, 322 p. (In Russ.)
- 14. Gorskiy Yu.M. *Informatsionnyye aspekty upravleniya i modelirovaniya* [Information Aspects of Management and Modeling], Moscow: Nauka, 1995, 264 p. (In Russ.)
- 15. Ivakin Ya.A.; Yusupov R.M. (Ed.) *Metody intellektualizatsii promyshlennykh geoinformatsionnykh sistem dlya dispetcherizatsii prostranstvennykh protsessov: monografiya* [Methods of Intellectualization of Industrial Geoinformation Systems for Dispatching Spatial Processes: monograph], St. Petesburg: Izdatel'stvo SPIIRAN, 2010, 239 p. (In Russ.)
- 16. Perova V.I., Lastochkina E.I. [Neural network modeling of the dynamics of innovation activity in the regions of the Russian Federation], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Seriya: Sotsial'nyye nauki* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. Series: Social Sciences], 2015, issue 3, pp. 49-58. (In Russ., abstract in Eng.)
- 17. Deboeck G., Kohonen T. Visual Exploration in Finance with Self-Organizing Maps, Springer-Verlag, 2013, 258 p.

#### Informationsunterstützung der Ausbildungssysteme für Bediener der aerogeophysischen Messtechnikprodukte

Zusammenfassung: Es ist eine Begründung für die Steigerung der Effizienz aerogeophysikalischer Arbeiten gegeben. Es Beispiele sind Implementierungsformen der Informationsunterstützung für Ausbildungssysteme für Bediener automatisierter Steuerungssysteme in Berufsbildungseinrichtungen gegeben. Als Option zur methodischen Unterstützung der Bedienerschulung ist die Möglichkeit der Integration interaktiver elektronischer technischer Handbücher in das automatisierte Steuerungssystem vorgestellt. Es eine Klassifizierung ist der Informationsunterstützung enthaltenen elektronischen Inhalte bereitgestellt. Es ist auf Notwendigkeit hingewiesen, Anforderungen zur Gewährleistung Informationssicherheit neu erstellter elektronischer Daten für Informationsfelder zu erfüllen

### Support d'informations des systèmes de la formation des opérateurs d'instruments aérogéophysiques

**Résumé:** Est donnée une justification de l'augmentation de l'efficacité des travaux aérogéophysiques. Sont donnés des exemples des modalités de la mise en œuvre des systèmes de la formation des opérateurs d'instruments aérogéophysiques dans les établissements de la formation professionnelle. Est présentée la possibilité d'intégrer des directions techniques électroniques interactifs dans les instruments aérogéophysiques en tant qu'option méthodologique pour la formation des opérateurs. Est donnée la classification du contenu électronique inclus dans le support d'information. Est noté qu'il est nécessaire de respecter les prescriptions relatives à la sécurité des données électroniques nouvellement créées pour les ensembles d'informations.

Авторы: Русина Алена Андреевна — старший преподаватель кафедры «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»; Семенова Елена Георгиевна — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и программная инженерия», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Россия; Балашов Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор, заместитель генерального конструктора по программно-целевому развитию, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.091-101

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ИНКРЕМЕНТНОГО ЭНКОДЕРА НА БАЗЕ ПРЕРЫВАНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОБЛЕМЫ ДРЕБЕЗГА КОНТАКТОВ

А. А. Пономарев , Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева

Кафедра математического моделирования и информационных технологий, caprimores@gmail.com; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** внешние прерывания; дребезг контактов; инкрементный энкодер; микроконтроллер; определение вращения; система.

Аннотация: Одной из ключевых проблем в задачах определения вращения инкрементных энкодеров является возникновение дребезга электрических контактов, из-за которого реализация алгоритмов анализа осуществляется не на базе прерываний, а на основе постоянного опроса, приводящего к неэффективному использованию процессорного времени. Проведено исследование данной проблемы, в ходе которого разработано комплексное аппаратно-программное решение в виде системы определения вращения, в том числе в условиях износа инкрементных энкодеров, приводящего к возникновению дребезга контактов. Предложены принципиальная электрическая схема универсального аппаратного сглаживающего фильтра для частичного подавления помех, а также асинхронный алгоритм анализа вращения на основе прерываний для эффективного использования вычислительных ресурсов управляющего устройства.

#### Введение

В последние десятилетия научно-технический прогресс привел к значительным инновациям в области бытовой техники, технического оборудования и устройств для опытов и экспериментов на основе микроконтроллеров [1]. При производстве промышленного оборудования, где требуется точное измерение положения, углов вращения или скорости движения, используются энкодеры различных типов. Например, в работе [2] представлена система управления электроприводом измельчителя плодоовощной продукции на базе микроконтроллера ATmega328, но в ней отсутствует подсистема определения скорости вращения электромотора. Отсутствие такой подсистемы может привести к поломке оборудования (в случае заклинивания продукции), а также делает установку полуавтоматической. В работе [3] исследуется и моделируется аппаратно-программный комплекс системы микроклимата на базе микроконтроллера ATmega2560, который можно усовершенствовать, обеспечив контроль работоспособности устройства охлаждения воздуха. Поскольку такие устройства в основном работают с использованием электромоторов, их работоспособность можно контролировать как с помощью датчиков тяги воздушных масс, так и простейших инкрементных энкодеров, позволяющих определять направление и скорость вращения. В работе [4] представлена система мониторинга и управления работой фронтального погрузчика трактора, где энкодеры, подключенные к микроконтроллеру, используются для измерения угла наклона стрелы. Применение системы определения скорости вращения трехфазного двигателя в условиях повышенного электромагнитного шума и последующая передача данных на персональный компьютер по протоколу универсального асинхронного приемопередатчика описаны в [5], но не учитывается проблема дребезга контактов энкодера, возникающего при его износе.

Дребезг контактов представляет собой явление, наблюдаемое в электромеханических системах, таких как микропереключатели, реле, кнопки, энкодеры, и его негативное влияние невозможно полностью устранить [6]. В работе [7] исследуется влияние дребезга контактов в микропереключателях с учетом электростатической силы затвора, демпфирования сжимающей пленки и пружинной модели контактных наконечников, но не предлагаются практические способы устранения данного эффекта. Принцип работы инкрементного энкодера EC11, причины возникновения дребезга в нем и его подключение к микроконтроллеру STM32 описаны в [8]. Однако алгоритм получения данных от энкодера реализован с использованием таймера, что может приводить к излишней вычислительной нагрузке, а предлагаемая электронная схема требует доработки, так как номиналы внутренних подтягивающих резисторов на разных микроконтроллерах отличаются.

Отсутствие комплексного решения для определения направления вращения инкрементного энкодера при дребезге контактов подчеркивает актуальность данного исследования.

*Целью работы* – разработка комплексного аппаратно-программного решения для широкого спектра микроконтроллеров, которое позволит получить информацию о вращении от инкрементного энкодера при наличии проблемы дребезга контактов. Аппаратное решение включает принципиальную электрическую схему, а программное – асинхронный алгоритм получения данных на основе прерываний и кольцевого буфера.

#### Теоретическая часть

Поворотные энкодеры — устройства для измерения углового перемещения или вращения, которые являются датчиками угла поворота [9, 10]. Обычно энкодер состоит из вращающегося диска и считывающего элемента, который регистрирует изменения положения вращающегося элемента и преобразует их в электрический сигнал. Абсолютные энкодеры предоставляют информацию о точном угловом положении вращающегося элемента независимо от его предыдущего положения, тогда как относительные (инкрементные) энкодеры фиксируют изменение угла относительно начального положения.

Типовой энкодер инкрементного типа имеет два канала (A, B). Фазовый сдвиг между сигналами A и B позволяет определять направление вращения. Так, если его значение положительно – вращение энкодера осуществляется в одну сторону, отрицательно – в противоположную:

$$\Delta \varphi = \varphi_{A} - \varphi_{B},\tag{1}$$

где  $\Delta \phi$  – фазовый сдвиг, °;  $\phi_A$  ,  $\phi_B$  – фазы каналов A и B соответственно, °.

Пример осциллограммы отображает фазовый сдвиг на каналах A (канал Ch1) и B (канал Ch2) при вращении энкодера (рис. 1).

Для того чтобы определить направление вращения, необходимо вычислить фазовые сдвиги (1) для каналов A и B соответственно. Предположим, энкодер имеет  $N_{\rm max}$  импульсов на один полный оборот, то есть каждый полный оборот вала или оси соответствует  $N_{\rm max}$  импульсам сигнала для каналов A и B. Тогда определение фазы сигнала для конкретно взятого канала может выражаться через

$$\varphi = (N/N_{\text{max}}) \cdot 360^{\circ}, \tag{2}$$

где N — текущее количество импульсов для канала A или B, шт./об;  $N_{\rm max}$  — число импульсов на полный оборот, шт./об.

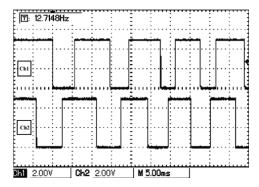


Рис. 1. Осциллограмма импульсов на каналах А и В при вращении энкодера

Определение разрешения (количества переходов) фазовых сигналов R,  $\mathrm{шт./of}$ , в инкрементных энкодерах имеет значение для повышения точности измерений углового или линейного перемещения и определяется как

$$R = 2CN_{\text{max}},\tag{3}$$

где C – число каналов, шт.

Разрешение энкодера (3) отображает число фазовых переходов (2) у равномерно смещенных каналов (или одного канала) в зависимости от количества импульсов на один полный оборот. Например, для энкодера EC11 разрешение составляет 80 фазовых переходов, поскольку он имеет два канала, каждый из которых при полном обороте создает 20 импульсов.

Определение вращения энкодеров программным обеспечением (ПО) может выполняться двумя методами: постоянного опроса и на базе прерываний. Метод постоянного опроса подразумевает настройку таймера микроконтроллера на периодический вызов функции, анализирующей состояние логических уровней на его выводах. Сигналы энкодера опрашиваются с фиксированной частотой  $F_{\rm pool}$ , определяемой таймером. Длительность периода использования процессорного времени (ПИПВ)  $T_{\rm timer}$ , с, при анализе вращения на основе метода постоянного опроса выражается

$$T_{\text{timer}} = F_{\text{pool}} t_{\text{analisys}},$$
 (4)

где  $F_{\rm pool}$  — количество запусков функции анализа вращения, раз;  $t_{\rm analisys}$  — длительность выполнения функции анализа вращения, с.

Анализ вращения на базе прерываний работает аналогично, но вызов функции анализа происходит не периодически, а по внешнему прерыванию – триггеру изменения логических уровней, срабатывающему в момент фазовых переходов сигнала на каналах при вращении энкодера. Длительность ПИПВ управляющего устройства  $T_{\text{intr}}$ , с, при анализе вращения на основе прерываний выражается через

$$T_{\text{intr}} = R \ U_{\text{rpm}} \ t_{\text{analisys}},$$
 (5)

где  $U_{\text{rpm}}$  – скорость вращения энкодера, об/с.

Внешние прерывания возникают при значительном изменении напряжения (переход от логического нуля к единице и обратно). Напряжение логической единицы зависит от аппаратного устройства микроконтроллера и обычно приближено к напряжению его питания. На рисунке 2 показаны диапазоны напряжений логических уровней для 5 и 3,3 В транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), которые описывают интерпретацию микроконтроллером высокого уровня (логическая единица) и низкого уровня (логический ноль).



Рис. 2. Напряжения логических уровней ТТЛ для 5 В (а); 3,3 В (б)

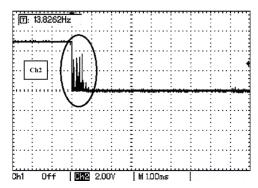


Рис. 3. Осциллограмма, отображающая наличие дребезга контактов

При сравнении процессов получения данных от энкодера с помощью постоянного опроса и на базе прерываний, очевидно, что при постоянном опросе используется больше процессорного времени (4). Однако определение вращения может быть точнее, поскольку проверка значений логических уровней на каналах происходит чаще, чем при использовании прерываний. Тем не менее такой процесс анализа улавливает возникающие паразитные помехи в сигнале, что требует использования алгоритмов сглаживания.

Применение внешних прерываний позволяет более рационально использовать процессорное время (5) и вызывать алгоритмы анализа вращения только при фазовых переходах. Однако точность определения направления вращения сильно зависит от наличия помех в сигнале, вызванных дребезгом контактов. На рисунке 3 показан пример дребезга контактов в инкрементном энкодере EC11 на канале В.

Для решения данной проблемы в основном применяются программные методы фильтрации и/или аппаратные сглаживающие фильтры [6]. Один из программных методов – использование таймеров для игнорирования переходных состояний в течение определенного времени после первого обнаружения переключения логических уровней; другой – использование машины состояний для определения и контроля фаз сигналов при вращении. При использовании аппаратных сглаживающих фильтров решением может являться применение конденсаторов или RC-цепочек.

#### Разработка сглаживающего фильтра

Для решения проблемы дребезга контактов с аппаратной стороны разработана электрическая схема сглаживающего фильтра на основе RC-цепочек для подключения энкодера к микроконтроллеру (рис. 4). Выводы A, G, B, BTN, G подключаются непосредственно к инкрементному энкодеру, а выводы МК A, МК B, МК

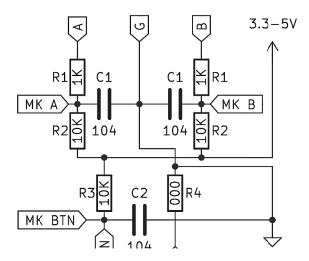


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема сглаживающего фильтра

ВТN – к микроконтроллеру. Резисторы R1 и R2 номиналом 1 и 10 кОм отвечают за время падения и нарастания фронтов напряжения на каналах A и B. Конденсаторы C1 (для каналов A и B) номиналом 1 мкФ предназначены для сглаживания пульсаций; при падении напряжения они разряжаются через резистор R1, а заряжаются через резистор R2. Предполагается, что длительность заряда будет значительно превышать длительность разряда (примерно в 10 раз). Резистор R3 номиналом 10 кОм ограничивает время заряда конденсатора C2 номиналом 1 мкФ в цепи кнопки энкодера. Разряд происходит очень быстро, так как резистор R4 является перемычкой с практически нулевым сопротивлением и может изменяться лишь в случаях необходимости ограничения длительности разряда.

Стоит заметить, что даже небольшое количество помех, особенно в диапазоне неопределенного логического уровня, все еще может приводить к значительному числу прерываний, что в свою очередь вызовет неверную интерпретацию сигналов вращения энкодера и излишнее использование процессорного времени. Минимизация данной проблемы осуществляется за счет использования программных алгоритмов фильтрации.

#### Разработка программного обеспечения для определения вращения

Для предотвращения реагирования на возможные пульсации и получения достоверных данных о вращении энкодера разработан асинхронный алгоритм анализа событийного типа на базе прерываний и кольцевого буфера. Вызов алгоритма сконфигурирован таким образом, что для канала А настроено прерывание на падение напряжения (при отсутствии вращения сигнал имеет значение логической единицы), а определение вращения осуществляется по каналу В. Это обусловлено тем, что логическое значение канала В к моменту срабатывания триггера прерывания может быть либо логической единицей, либо логическим нулем согласно фазовому сдвигу (1) между каналами. Значение логического уровня канала В является основным источником информации о направлении вращения.

Для минимизации ложных срабатываний анализ вращения должен осуществляться с некоторой задержкой, которая подбирается эмпирически для конкретного экземпляра энкодера. Выбор канала для прерывания (при возможности определения степени дребезга контактов канала) должен осуществляться по критерию меньшего износа, то есть числа возникновений паразитных помех. Схема работы алгоритма прерывания, анализирующего вращение энкодера, показана на рис. 5.



Рис. 5. Схема работы алгоритма анализа вращения

В алгоритме анализа используется кольцевой буфер для минимизации использования процессорного времени, а также для возможности не блокировать исполнение основного кода ПО. На рисунке 6 представлен фрагмент кода (на языке C/C++), содержащий инициализацию конфигурационных параметров, переменных, необходимых для работы алгоритма, и функцию обработчика прерываний ENC\_ESR(), которая определяет направление вращения.

```
#define CHANNEL_A_PIN 2
#define CHANNEL_B_PIN A3
#define MIN_TIME_BETWEEN_ISR_MS 3

uint32_t lastTimeISR = 0;
RingBuffer ringBuffer(10);
enum EncoderRotateEvent {LEFT, RIGHT};

void ENC_ESR() {
   if (millis() - lastTimeISR < MIN_TIME_BETWEEN_ISR_MS) return;
   lastTimeISR = millis();
   if (digitalRead(CHANNEL_B_PIN)) ringBuffer.write(LEFT);
   else ringBuffer.write(RIGHT);
}</pre>
```

Рис. 6. Фрагмент кода алгоритма анализа вращения энкодера

Стоит отметить, что извлечение события из кольцевого буфера и обработка события вращения энкодера должны осуществляться в основном потоке исполнения кода, что подразумевает использование асинхронной, неблокирующей архитектуры ПО.

#### Экспериментальная часть

На основе спроектированной принципиальной схемы аппаратного фильтра сглаживания пульсаций собрана электронная схема, работоспособность которой тестировалась при напряжениях 3,3 и 5 В для обеспечения возможности применения на микроконтроллерах с уровнями напряжения ТТЛ. Электронная схема также использовалась для проверки наличия дребезга контактов на различных скоростях вращения энкодера (0,05...1,0 об./с).

Разработка ПО, реализующего алгоритм, проводилась в среде Platformio IDE при использовании фреймворка Arduino и на базе платы Arduino Nano, в основе которой используется микроконтроллер ATmega328p с напряжением логического уровня 5 В. Канал А энкодера подключен к выводу D2 платы с микроконтроллером. В конфигурации алгоритма настроено внешнее прерывание INTO на падение напряжения, которое реагирует на изменение логического уровня вывода D2. Канал В, участвующий в анализе вращения, подключен к выводу А3. Задержка для алгоритма подобрана опытным путем при проведении тестов на 5 образцах энкодеров EC11 и составила 3 мс (усредненное значение). Поиск оптимального значения осуществлялся с шагом 1 мс в диапазоне 1...5 мс.

#### Результаты и их обсуждение

При быстром вращении ручки энкодера выявлено, что дребезг контактов происходит редко (не более чем в 5 % случаев) и сильно зависит от износа. Собранная электрическая схема подавляет возникающие помехи в более чем 95 % случаев для исследуемых образцов. При единичных вращениях дребезг контактов на изношенном энкодере проявлялся достаточно часто (в среднем 20 %), а создаваемые помехи значительно (на 80-90 %) подавлялись сглаживающим фильтром, что показано на осциллограмме (рис. 7.)

Дребезг в таких случаях возникал из-за резкого изменения скорости (импульса) металлических контактов при старте и окончании вращения. При скорости вращения ручки энкодера от 0,5 об/с сглаживание было близко к идеальному (рис. 8), а амплитуда сигнала значительно (в 2,5 раза при ТТЛ 5 В) превышала уровень, считаемый за минимально высокий. Это подтверждает верно подобранное соотношение скорости заряда и разряда конденсаторов — 1:10.

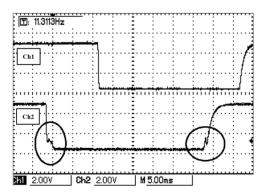


Рис. 7. Редкие случаи возникновения помех при сильном дребезге контактов и единичных импульсах

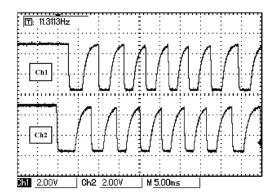


Рис. 8. Осциллограмма сигналов при быстром вращении энкодера

Для оценки эффективности методов анализа вращения энкодера выполнены расчеты на основе формул (4) и (5). Рассмотрим пример. Пусть таймер микроконтроллера настроен на вызов функции анализа вращения в количестве  $F_{\rm pool}$  500 раз в секунду. Длительность выполнения функции анализа  $t_{\rm analisys}$  составляет  $2\cdot 10^{-4}$  с, а разрешение R равно 80 импульсам на один оборот. Для метода на основе постоянного опроса длительность ПИПВ не будет меняться при изменении скорости вращения ручки энкодера и будет всегда равна 0,1 с. При скорости вращения  $U_{\rm rpm}=1$  об/с для метода анализа на основе прерываний длительность ПИПВ составит 0,016 с. Так как скорости вращения больше 1 об./с при вращении ручки энкодера EC11 рукой являются труднодостижимыми, расчет эффективности при больших скоростях не будет иметь смысл для данной модели. Исходя из полученных результатов, эффективность метода на основе прерываний при скорости в 1 об./с в сравнении с методом на базе постоянного опроса составит 84 %, а в состоянии отсутствия вращения данный метод не использует процессорное время.

#### Заключение

В ходе проведенного исследования проанализирована проблема неверной интерпретации вращения вследствие возникновения дребезга контактов инкрементных энкодеров и предложено комплексное аппаратно-программное решение для ее минимизации. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность применения сглаживающего фильтра и асинхронного алгоритма на основе прерываний, которые значительно снижают число ошибок при обработке сигналов даже при износе энкодера. Полученное решение позволяет эффективно использовать процессорное время (от 84 % и более), обеспечивая точность анализа более 90 % при определении вращения в условиях умеренного износа механизма энкодера для скорости вращения его ручки в диапазоне 0,05...1,0 об./с. Дальнейшее развитие данного исследования подразумевает адаптацию предложенных методов к другим моделям и типам управляющих устройств, а также подбор оптимальных задержек алгоритма анализа для иных датчиков угла поворота.

#### Список литературы

- 1. Применение микроконтроллерных систем в исследованиях (на примере машины Атвуда) / Н. М. Сухомлинов, А. Г. Финогеев, Т. В. Смирнова, В. Д. Иващенко, Д. С. Парыгин// Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. -2022. Т. 59, № 3. С. 112-121. doi: $10.54398/20741707_2022_3_112$
- 2. Лебедь, Н. И. Моделирование системы управления автоматизированного электропривода измельчителя плодоовощной продукции в виртуальной симуля-

- ционной среде / Н. И. Лебедь // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2022. Т. 28, № 2. С. 205 213. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.205-213
- 3. Исследование и моделирование режимов работы программно-аппаратного комплекса системы микроклимата на базе микроконтроллера ATMEGA2560 / Н. И. Лебедь, К. Е. Токарев, Д. Д. Нехорошев, М. П. Аксенов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. -2022. T. 28, № 4. C. 596 605. doi: 10.17277/vestnik. 2022.04.pp.596-605
- 4. Mukhopadhyay, S. C. Embedded Microcontroller and Sensors Based front End Loader Control System / S. C. Mukhopadhyay, G. S. Gupta, J. W. Howarth // Instrumentation and Measurement Technology Conference. -2008. -P. 1509-1514. doi: 10.1109/IMTC.2008.4547282
- 5. Венедиктов, Ф. А. Определение положения рабочего органа с помощью инкрементного энкодера и микроконтроллера / Ф. А. Венедиктов, А. А. Голышева // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. -2018.-T.2.-C.55-58.
- 6. Yershov, R. Software-Based Contact Debouncing Algorithm with Programmable Auto-Repeat Profile Feature / R. Yershov, V. Voytenko, V. Bychko // International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). 2019. P. 813 818. doi: 10.1109/PICST47496. 2019.9061500
- 7. A dynamic model, including contact bounce, of an electrostatically actuated microswitch/ McCarthy B., G. G. Adams, N. E. McGruer, D. Potter // Journal of Microelectromechanical Systems. -2002.-V.11, No. 3.-P.276-283. doi: 10.1109/JMEMS.2002.1007406
- 8. Кондратьев, Н. О. Устройство ввода информации на базе механического инкрементального энкодера ЕС11 / Н. О. Кондратьев, К. А. Кузнецов, В. Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. -2017. -T. 20, № 2. -C. 39-45.
- 9. Аксенов, О. И. Анализ возможностей использования аморфных микропроводов в магнитоимпедансных датчиках, предназначенных для информационно-измерительных и управляющих систем / О. И. Аксенов, А. В. Рыбаков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. -2016. Т. 32, № 2. С. 98-111.
- 10. Разработка концепции и опытного образца оптического энкодера на эффекте муара /В. Д.Забровский, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова, В. И. Коновалов, Ж. К. Мофу // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. -2023. Т. 29, № 3. С. 383 389. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.383-389

### Development of a System for Determining the Direction of Incremental Encoder Rotation Based on Interrupts in Case of Contact Bounce

A. A Ponomarev<sup>⊠</sup>, D. S. Solovjev, I. A. Solovjeva

Department of Mathematical Modeling and Information Technologies, caprimores@gmail.com; Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

**Keywords:** external interrupts; contact bounce; incremental encoder; microcontroller; rotation detection; system.

**Abstract:** The occurrence of electrical contact bounce is one of the key problems in the problem of determining the rotation for incremental encoders, due to which the implementation of analysis algorithms is carried out not on the basis of interrupts, but

on the basis of constant polling, leading to inefficient use of processor time. The article studies this problem, during which a comprehensive hardware and software solution is developed in the form of a system for determining rotation taking into account the wear of incremental encoders, leading to the contact bounce occurrence. A basic electrical circuit of a universal hardware smoothing filter for partial suppression of interference is proposed. An asynchronous algorithm for analyzing rotation based on interrupts for the efficient use of computing resources is considered.

#### References

- 1. Suhomlinov N.M., Finogeev A.G., Smirnova T.V., Ivashhenko V.D., Parygin D.S. [Application of microcontroller systems in research (using the example of Atwood's machine)], *Journal: Control and High Technologies*, 2022, vol. 59, no. 3, pp.112-121. doi:10.54398/20741707 2022 3 112. (In Russ., abstract in Eng.).
- 2. Lebed N.I. [Modeling the Control System of an Automated Electric Drive for a Fruit and Vegetable Chopper in a Virtual Simulation Environment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 205-213. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.205-213 (In Russ., abstract in Eng.)
- 3. Lebed N.I., Tokarev K.E., Nehoroshev D.D., Aksenov M.P. [Research and Simulation of Operation Modes of Hardware-Software Complex of Microclimate System Based on Programmable Microcontroller ATmega2560], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 596-605. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.596-605 (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Mukhopadhyay S.C., Gupta G.S., Howarth J.W. Embedded microcontroller and sensors based front end loader control system, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2008, pp. 1509-1514.
- 5. Venediktov F.A., Golysheva, A.A. [Determination of implement positions using an incremental encoder and microcontroller], *Applied mathematics and computer science: modern research in the field of natural and technical sciences* [Applied Mathematics and Computer Science: Modern Research in the Field of Natural and Technical Sciences], 2018, vol. 2, pp. 55-58. (In Russ.)
- 6. Yershov R., Voytenko, V., Bychko, V. Software-based contact debouncing algorithm with programmable auto-repeat profile feature, *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2019, pp. 813-818.
- 7. McCarthy B., Adams G.G., McGruer N.E., Potter D. A dynamic model, including contact bounce, of an electrostatically actuated microswitch, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, vol. 11, no. 3, pp. 276-283. doi: 10.1109/JMEMS.2002.1007406.
- 8. Kondrat'ev N.O., Kuznecov K.A., Trubin V.G. [Information Input Device on the Basis of Mechanical Incremental Encoder EC11], *Avtomatika i programmnaya inzheneriya* [Automation and software engineering], 2017, vol. 2, no. 20, pp. 39-45. (In Russ., abstract in Eng.)
- 9. Aksenov O.I., Rybakov A.V. [Analysis of the possibilities of using amorphous microwires in magnetic impedance sensors intended for information-measuring and control systems], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2016, vol. 32, no. 2, pp. 98-11. (In Russ., abstract in Eng.).
- 10. Zabrovskij V.D., Divin A.G., Ljubimova D.A., Konovalov V.I., Mofu Zh.K. [Development of a concept and prototype of an optical encoder based on the moire effect], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 383-389. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.383-389. (In Russ., abstract in Eng.).

#### Entwicklung eines Richtungsbestimmungssystems der auf Interrupt basierten inkrementellen Drehgeberrotationen bei Problemen mit Kontaktknall

Zusammenfassung: Eines der Hauptprobleme bei der Bestimmung der Drehung von inkrementellen Encoder ist das Auftreten von elektrischem Kontaktprellen, weshalb die Implementierung von Analysealgorithmen nicht auf der Grundlage von Interrupts, sondern auf der Grundlage ständiger Abfragen erfolgt, was zu einer ineffizienten Nutzung der Prozessorzeit führt. Zu diesem Problem war eine Studie durchgeführt, in deren Verlauf eine umfassende Hardware- und Softwarelösung in Form eines Rotationserkennungssystems entwickelt worden war, auch unter den Bedingungen des Verschleißes inkrementeller Encoder, der zum Auftreten von Kontaktprellen führt. Es sind ein grundlegender elektrischer Schaltplan eines universellen Hardware-Glättungsfilters zur teilweisen Unterdrückung von Störungen sowie ein asynchroner Algorithmus zur Rotationsanalyse basierend auf Interrupts zur effizienten Nutzung der Rechenressourcen des Steuergeräts vorgeschlagen.

### Mise au point d'un système d'orientation de rotation du codeur incrémental sur àla base d'interruptions en cas de problème de cliquetis

**Résumé:** L'un des principaux problèmes rencontrés dans la détermination de la rotation des encodeurs incrémentiels est l'apparition d'un cliquetis de contact électrique, qui fait que les algorithmes d'analyse ne sont pas mis en œuvre sur à base d'interruptions, mais à la base d'une interrogation continue, ce qui entraîne une utilisation non efficace du temps processeur. Est menée une étude sur ce problème, au cours de laquelle une solution matérielle et logicielle complète est développée sous la forme d'un système de détection de rotation, y compris dans des conditions d'usure des encodeurs incrémentiels, entraînant l'apparition d'une perceuse sans contact. Est proposé le schéma de principe d'un filtre de lissage matériel universel pour la suppression partielle des interférences, ainsi qu'un algorithme asynchrone d'analyse de rotation basé sur les interruptions pour une utilisation efficace des ressources informatiques du dispositif de commande.

Авторы: Пономарев Артур Анатольевич — аспирант кафедры математического моделирования и информационных технологий; Соловьев Денис Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий; Соловьева Инна Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

### Процессы и аппараты химических и других производств. Химия

УДК 66.021.3

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.102-110

## МАССОПРОВОДНОСТЬ ПРИ ЭКСТРАГИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### М. К. Кошелева⊠

Кафедра энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, oxtpaxt@yandex.ru, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

**Ключевые слова:** кинетика; массопроводность; промывка волокнистых материалов; шерстяная ткань; экстрагирование.

Аннотация: На основе экспериментальных кривых кинетики процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов в химической технологии их отделки определены кинетические коэффициенты массопроводности в зависимости от массосодержания материала. Для определения коэффициентов массопроводности использовался зональный метод и его модификация, не требующая специальных условий снятия кинетических кривых. Рассмотрены процессы удаления воскообразных веществ из хлопчатобумажных тканей при отварке, щелочи и красителя при промывке после мерсеризации и крашения, жировых загрязнений при промывке плотных шерстяных тканей. Коэффициенты массопроводности определены в зависимости от массосодержания распределяемого технологического компонента по кинетическим кривым. Полученные коэффициенты массопроводности могут быть использованы в кинетических расчетах процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов.

#### Введение

Для расчета массообменных процессов экстрагирования технологических загрязнений (незафиксированных красителей, поверхностно-активных веществ, щелочи, жировых веществ и др.) необходимо определение кинетических коэффициентов массопроводности. Зависимость данных кинетических коэффициентов от концентрации можно определять по снятым в специальных условиях кривым кинетики массообменного процесса [1-5].

В работе [2] приводится метод определения коэффициента массопроводности из кривой кинетики массообменного процесса, полученной без снятия внешнедиффузионного сопротивления. Кривая кинетики массообменного процесса экстрагирования технологических загрязнений (промывки) практически всегда содержит первый период, в котором процесс лимитируется внешней диффузией, и второй – где внутридиффузионное сопротивление оказывает влияние на кинетику процесса [1-7]. Концентрационная зависимость коэффициента массопроводности определяется из кривой кинетики удаления технологического загрязнения из волокнистого материала.

Внутренний массоперенос описывается уравнением массопроводности [2, 4]

$$i = -k\rho_0 \frac{\partial u}{\partial n},\tag{1}$$

где k — коэффициент массопроводности,  $m^2/c$ ; u — среднеобъемное массосодержание материала в момент времени  $\tau$ ; n — нормаль  $\kappa$  изоконцентрационной поверхности,  $\kappa$ ;  $\rho_0$  — плотность абсолютно сухого материала,  $\kappa r/m^3$ .

*Цель работы* — на основе экспериментальных кривых кинетики процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов в химической технологии их отделки определить кинетические коэффициенты массопроводности в зависимости от массосодержания материала.

#### Материалы и методы исследований

Аналитическое решение дифференциального уравнения массопроводности для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра и шара при равномерном начальном распределении массосодержания имеет вид [2, 4, 5]

$$\overline{E} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{R^2} k \tau\right),\tag{2}$$

где  $B_n$  и  $\mu_n$  – коэффициенты, зависящие от формы тела и числа Био массообменного модифицированного; R – определяющий размер тела, м;  $\tau$  – время, с.

Ряд в решении (2) быстро сходится и, начиная с некоторого момента времени, наступает регулярный режим, для которого величина  $\overline{E}$  описывается первым членом ряда [2, 4]

$$\overline{E} = B_1 \exp\left(-\frac{\mu_1^2}{R^2} k \tau\right). \tag{3}$$

При расчете за начало второго периода принимается точка K на кривой кинетики экстрагирования, которая разделяет первый и второй периоды, называется критической точкой и соответствует критическому массосодержанию  $U_{\rm KD}$ .

Для нахождения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности k=f(U) весь диапазон изменения массосодержания технологического загрязнения в материале разбивается от  $U_{\rm kp}$  до  $U_{\rm k}$  (где  $U_{\rm k}$  – конечное массосодержание на экспериментальной кинетической кривой экстрагирования — промывки) на N интервалов (концентрационных зон). Для каждого из интервалов находится значение коэффициента массопроводности по решению, справедливому в регулярном режиме [2].

На рисунке 1 приведена лабораторная экспериментальная кинетическая кривая промывки плотной шерстяной ткани от жировых технологических загрязнений [6-8].

Коэффициенты массопроводности определяли по методике [2], разбивая кривую кинетики при  $U < U_{\rm kp}$  на концентрационные зоны, приведенные в табл. 1. Как видно из табл. 1, коэффициент массопроводности жировых технологических загрязнений k имеет порядок  $10^{-9}$ , что согласуется по порядку величины со значениями этого коэффициента при экстрагировании различных компонентов из разных твердых материалов [4, 9 – 13].

На рисунке 2 представлены лабораторные кинетические кривые промывки, полученные при экстрагировании технологического загрязнения гидроксида на-

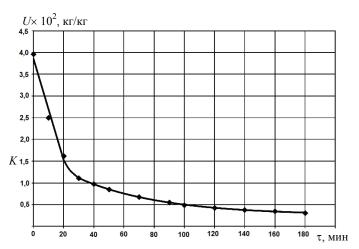


Рис. 1. Экспериментальная кривая кинетики промывки плотной шерстяной ткани (поверхностная плотность  $780 \text{ г/m}^2$ )

Таблица 1 Коэффициенты массопроводности при экстрагировании жировых веществ из плотной шерстяной ткани

Поможети	Концентрационные зоны			
Параметр	1	2	3	
Диапазон на кинетической кривой $(U_{\rm H}{}_i - U_{\rm K}{}_,{}_i) \cdot 10^2,{\rm kr/kr}$	1,5090,795	0,7950,34	0,340,31	
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	1,69	1,62	1,39	

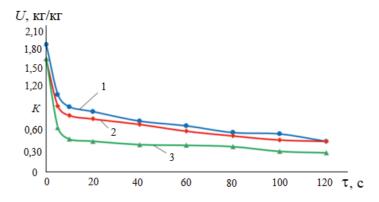


Рис. 2. Кинетика промывки хлопчатобумажных тканей различной плотности от гидроксида натрия при разных MB:

1 – двунитка (MB = 100); 2 – двунитка (MB = 500); 3 – миткаль (MB = 100)

трия из хлопчатобумажных тканей (ткань обрабатывается щелочью в процессе мерсеризации). Ткани отличались поверхностной плотностью, менялся модуль промывной ванны ( $\mathbf{MB}$ ) (соотношение массы промывного раствора и массы ткани) [1, 3].

Таблица 2 Коэффициенты массопроводности при экстрагировании гидроксида натрия из хлопчатобумажной ткани средней плотности (двунитка)

Параметр	Концентрационные зоны			
	1	2	3	
Диапазон на кинетической кривой $(U_{\rm H\ \it i}-U_{\rm K,\ \it i}),{\rm kr/kr}$	0,9950,765	0,7650,645	0,6450,475	
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	1,258	0,534	0,486	

Коэффициенты массопроводности определяли, разбивая кривую кинетики 3 при  $U < U_{\rm Kp}$  на три интервала. В таблице 2 приведены рассчитанные по методике [2] коэффициенты массопроводности щелочи — гидроксида натрия, из хлопчатобумажной ткани. В процессе отварки из хлопчатобумажных тканей экстрагируется сложная смесь из углеводородов, органических кислот, эфиров, спиртов, а также минеральные соли и воскообразные вещества.

Расчет коэффициентов массопроводности k зональным методом для хлопчатобумажной ткани при экстрагировании воскообразных веществ в процессе отварки проводился на основе экспериментальной кинетической кривой (рис. 3), при температуре 100 °C и концентрации гидроксида натрия в варочном растворе — 70 г/л [8].

В таблице 3 представлены кинетические коэффициенты массопроводности для процесса отварки при вышеприведенных параметрах процесса.

Кинетические коэффициенты массопроводности для процесса экстрагирования красителя из хлопчатобумажной ткани определялись на основании полученной в промышленных условиях кривой кинетики промывки от незафиксированного активного красителя, приведенной на рис. 4. На основании данной кривой получены значения коэффициентов массопроводности, приведенные в табл. 4.

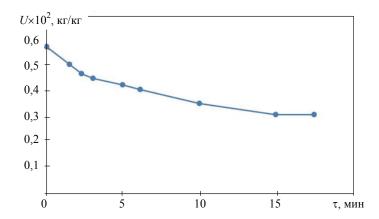


Рис. 3. Экспериментальная кривая кинетики процесса экстрагировании воскообразных веществ из хлопчатобумажной ткани

Таблица 3 Коэффициенты массопроводности при экстрагировании технологических загрязнений из хлопчатобумажной ткани в процессе отварки

Попольти	Концентрационные зоны			
Параметр	1	2	3	
Диапазон на кинетической кривой $(U_{\rm H}_i - U_{\rm K}_i) \cdot 10^2$ , кг/кг	0, 460, 40	0, 460, 40	0,3450,30	
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	0,0791	0,0978	0,0326	

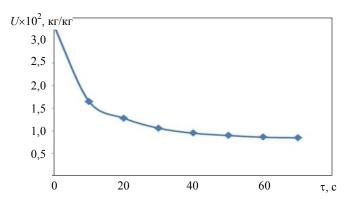


Рис. 4. Кинетика процесса промывки хлопчатобумажной ткани после крашения активным красителем

Таблица 4 Коэффициенты массопроводности при экстрагировании активного красителя из хлопчатобумажной ткани

Попоможн	Концентрационные зоны			
Параметр	1	2	3	
Диапазон на кинетической кривой $(U_{\rm H\ \it i}-U_{\rm K,\ \it i})\cdot 10^2,{\rm kr/kr}$	1,651,28	1,061,10	1,100,95	
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	1,506	1,124	0,642	

#### Результаты и обсуждения

На рисунках 5 приведены опытные и рассчитанные с использованием полученных коэффициентов массопроводности кривые кинетики экстрагирования различных технологических загрязнений (активного красителя, воскообразных веществ, щелочи) из хлопчатобумажных тканей. Опытные экспериментальные кинетические кривые снимались на лабораторных модельных установках [1, 3, 12, 13].

Расчет времени промывки осуществлялся зональным методом с использованием уравнения [2, 4, 11]

$$k_i \mu_{1,i}^2 = \frac{R^2}{\tau_i} \ln \frac{B_1^*}{\overline{E}_i} \,. \tag{4}$$

Очевидно хорошее совпадение опытных и рассчитанных зональным методом кинетических кривых экстрагирования различных технологических загрязнений из хлопчатобумажной ткани при проведении процессов промывки и отварки (см. рис. 5).

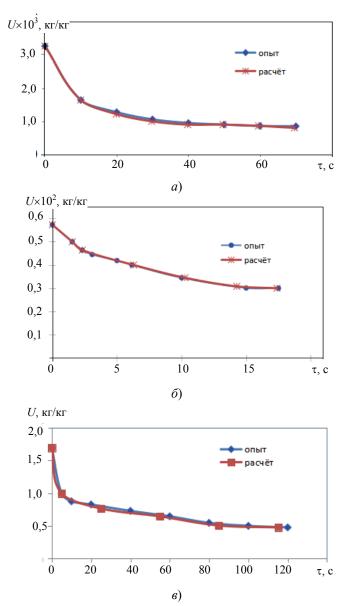


Рис. 5. Кинетика экстрагирования активного красителя (a) воскообразных веществ  $(\delta)$ , щелочи (s)

#### Заключение

На основе экспериментальных кривых кинетики процессов экстрагирования технологических загрязнений из волокнистых материалов в химической технологии их отделки при проведении процессов удаления из хлопчатобумажных тканей воскообразных веществ при отварке, при их промывке после обработки щелочью и после крашения, при промывке плотных шерстяных тканей от жировых загрязнений получены данные по коэффициентам массопроводности в зависимости от массосодержания ткани. Коэффициенты массопроводности могут быть использованы в кинетических расчетах процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов.

- 1. Сажин, Б. С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов : монография / Б. С. Сажин, М. К. Кошелева, М. Б. Сажина. М. : Изд-во ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013.-301 с.
- 2. Рудобашта, С. П. Определение коэффициентов массопередачи и массопроводности из кривых кинетики / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6(360). С. 175 180.
- 3. Реутский, В. А. Расчет процесса промывки при фильтрации моющего раствора сквозь полотно ткани / В. А. Реутский, А. А. Щеголев, М. К. Кошелева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1984. № 5. С. 50 54.
- 4. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М. : Химия, 1980.-248 с.
- 5. Плановский, А. Н. Определение области регулярного режима в задачах массопроводности / А. Н. Плановский, С. П. Рудобашта, Г. С. Кормильцин // Теоретические основы химической технологии. 1972. Т. VI, № 3. С. 459 462.
- 6. Кошелева, М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии / М. К. Кошелева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. -2005. N = 2. C. 100 105.
- 7. Анализ плотных шерстяных тканей как объекта технологической обработки и интенсификация процесса их отделки / М. К. Кошелева, П. П. Кереметин, А. А. Булекова, Д. А. Наумов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. -2007. N = 2. C. 118 121.
- 8. Кричевский, Г. Е. Химическая технология текстильных материалов / Г. Е. Кричевский, М. В. Корчагин, А. В. Сенахов. М.: Легпромбытиздат, 1985. 640 с.
- 9. Аксельруд, А. А. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость / А. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. Л. : Химия, 1974. 255 с.
- 10. Мельников, Б. Н. Применение красителей / Б. Н. Мельников, Г. И. Виноградова. М. : Химия, 1986. 240 с.
- 11. Кошелева, М. К. Влияние ультразвукового поля на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. -2019. Т. 92, № 5. С. 2404-2409.
- 12. Kosheleva, M. K. Improving the Efficiency of the Extraction Process in Production of Hygroscopic Fibrous Materials / M. K. Kosheleva, O. R. Dornyak, E. N. Shirokopoyas // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2022. Т. 28, № 1. С. 94 102. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.094-102
- 13. Kosheleva, M. K. A Resource-Saving Process of Extracting Industrial Contaminates from Fibrous Material / M. K. Kosheleva, O. R. Dornyak, M. Z. Tsintsadze // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. − 2020. − Т. 26, № 3. − С 411 − 420. doi: 10.17277/ vestnik.2020.03.pp.411-420

### Mass Conductivity during Extraction of Technological Contaminants from Fibrous Materials

#### M. K. Kosheleva⊠

Department of Energy Resource Efficient Technologies, oxtpaxt@yandex.ru, Industrial Ecology and Safety. A. N. Kosygin Russian State University (Technologies.Design. Art), Moscow, Russia

**Keywords:** kinetics; mass conductivity; washing of fibrous materials; dense woolen fabric; extraction.

**Abstract:** On the basis of the experimental curves of the kinetics of the processes of extraction of various technological contaminants from fibrous materials in the chemical technology of their finishing, the kinetic coefficients of mass conductivity were determined depending on the mass content of the material. To determine the mass conductivity coefficients, the zonal method and its modification were used, which do not require special conditions for removing kinetic curves. The processes of removing waxy substances from cotton fabrics during boiling, alkali and dye during washing after mercerization and dyeing, and fatty impurities during washing of dense woolen fabrics are considered. The mass conductivity coefficients were determined depending on the mass content of the distributed technological component according to kinetic curves. The obtained mass conductivity coefficients can be used in kinetic calculations of extraction processes of various technological contaminants from fibrous materials.

#### References

- 1. Sazhin B.S., Kosheleva M.K., Sazhina M.B. *Protsessy sushki i promyvki tekstil'nykh materialov : monografiya* [Drying and washing processes of textile materials: a monograph], Moscow: Izd-vo Federal State Budgetary Educational Institution "MGUDT", 2013, 301 p. (In Russ.)
- 2. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K. [Determination of mass transfer and mass conductivity coefficients from kinetic curves], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 2015, no. 6(360), pp. 175-180. (In Russ., abstract in Eng.)
- 3. Reutsky V.A., Shchegolev A.A., Kosheleva M.K. [Calculation of the washing process during filtration of a detergent solution through a cloth], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 1984, no. 5, pp. 50-54. (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Rudobashta S.P. *Massoperenos v sistemakh s tverdoy fazoy* [Mass transfer in systems with a solid phase], Moscow: Chemistry, 1980, 248 p. (In Russ.)
- 5. Planovsky A.N., Rudobashta S.P., Kormiltsin G.S. [Determination of the area of the regular regime in mass conduction problems], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*. [Theoretical foundations of chemical technology], 1972, vol. VI, no. 3, pp. 459-462. (In Russ., abstract in Eng.)
- 6. Kosheleva M.K. [Improving the production and environmental safety of the finishing production of fine-grain factories due to the improvement of technology], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 2005, no. 2, pp. 100-105. (In Russ., abstract in Eng.)
- 7. Kosheleva M.K., Keremetin P.P., Bulekova A.A., Naumov D.A. [Analysis of dense woolen fabrics as an object of technological processing and intensification of their finishing process], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 2007, no. 2, pp. 118-121. (In Russ., abstract in Eng.)
- 8. Krichevsky G.E., Korchagin M.V., Senakhov A.V. *Khimicheskaya tekhnologiya tekstil'nykh materialov* [Chemical technology of textile materials], Moscow: Legprombytizdat, 1985, 640 p. (In Russ.)
- 9. Akselrud A.A., Lysyansky V.M. *Ekstragirovaniye*. *Sistema tverdoye telo-zhidkost'* [Extraction. Solid-liquid system], Leningrad: Khimiya, 1974, 255 p. (In Russ.)
- 10. Melnikov B.N., Vinogradova G.I. *Primeneniye krasiteley* [Application of dyes], Moscow: Khimiya, 1986, 240 p. (In Russ.)
- 11. Kosheleva M.K., Rudobashta S.P. [Influence of the ultrasonic field on the kinetic coefficients in the extraction process], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 2019, vol. 92, no. 5, pp. 2404-2409. (In Russ., abstract in Eng.)

- 12. Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Shirokopoyas E.N. Improving the efficiency of the extraction process in production of hygroscopic fibrous materials, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 94-102. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.094-102
- 13. Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Tsintsadze M.Z. A resource-saving process of extracting industrial contaminants from fibrous material, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 411-420. doi: 10.17277/vestnik. 2020.03.pp.411-420

### Massenleitfähigkeit bei der Extraktion der technologischen Verschmutzungen aus Fasermaterialien

Zusammenfassung: Basierend auf experimentellen Kurven der Kinetik der Prozesse der Extraktion verschiedener technologischer Verunreinigungen aus Fasermaterialien in der chemischen Technologie, ihrer Veredelung sind die kinetischen Koeffizienten der Massenleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Massengehalt des Materials bestimmt. Zur Bestimmung der Massenleitfähigkeitskoeffizienten ist die Zonenmethode und ihre Modifikation verwendet, die keine besonderen Bedingungen für die Aufzeichnung kinetischer Kurven erfordert. Der Artikel untersucht die Prozesse zur Entfernung wachsartiger Substanzen aus Baumwollstoffen beim Kochen, von Alkali und Farbstoffen beim Waschen nach der Merzerisierung und Färbung sowie von fetthaltigen Verunreinigungen beim Waschen dichter Wollstoffe. Die Massenleitfähigkeitskoeffizienten sind in Abhängigkeit vom Massengehalt der verteilten technologischen Komponente gemäß kinetischen Kurven bestimmt. Die erhaltenen Massenleitfähigkeitskoeffizienten können bei kinetischen Berechnungen von Prozessen zur Extraktion verschiedener technologischer Verunreinigungen aus Fasermaterialien verwendet werden.

### Conductivité massique lors de l'extraction des pollutions technologiques des matériaux fibreux

**Résumé:** A la base des courbes expérimentales de la cinétique des processus d'extraction de divers contaminants technologiques à partir de matériaux fibreux, est déterminée la technologie chimique des effets cinétiques de la conductivité massique en fonction de la teneur en masse du matériau. Pour déterminer les coefficients de conductivité massique, est utilisé la méthode zonale et sa modification, qui ne nécessite pas de conditions particulières pour l'enlèvement des courbes cinétiques. Sont examinés les processus d'élimination des substances cireuses des tissus de coton lors de la cuisson, de l'alcali et du colorant lors du lavage après la mercerisation et la teinture, les impuretés graisseuses lors du lavage des tissus de laine denses. Les coefficients de conductivité massique sont déterminés en fonction de la teneur en masse du composant technologique distribué le long des courbes cinétiques. Les coefficients de conductivité de masse obtenus peuvent être utilisés dans les calculs cinétiques des processus d'extraction de divers contaminants technologiques à partir de matériaux fibreux.

**Автор:** *Кошелева Мария Константиновна* — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.111-117

#### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА В ВАКУУМЕ

В. А. Еськов<sup>1,2</sup>, А. Н. Пахомов<sup>1⊠</sup>

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), panpost@yandex.ru; АО «Росхимзащита» (2), Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** вакуум; весы; датчик угла поворота; кинетика сушки; регенеративный продукт; сушка; тензодатчик.

Аннотация: Рассмотрены возможности применения в вакуммной сушильной камере стандартных лабораторных электронных весов, весов, построенных на основе системы тензодатчиков и модернизированных механических весов. Показано, что стандартные лабораторные электронные весы и специализированные весы на тензодатчиках не позволяют получить корректные данные по убыли веса при сушке регенеративного продукта в вакууме. Разработана конструкция механических весов, исключающих влияние вакуумирования и нагрева сушильной камеры, позволяющих производить измерения веса высушиваемых образцов в диапазоне 1...5 кг с чувствительностью до 1 г.

#### Введение

В производстве дыхательных аппаратов изолирующего типа важнейшее значение имеет качество применяемого регенеративного продукта [1, 2]. Как показывает практика, в процессе изготовления регенеративного продукта наиболее важной стадией, определяющей качество готового продукта, является стадия сушки [3, 4]. Для контроля процесса производства и исследования кинетики сушки регенеративного продукта необходимо регистрировать изменение веса высушиваемых пластин во всем цикле получения готового продукта, от стадии пропитки до стадии упаковки [3]. Наибольший интерес и сложность получения кривой сушки при производстве регенеративного продукта представляет собой стадия вакуумной сушки. В работе [5] отдельно отмечены проблемы, возникающие при сушке регенеративных продуктов только под вакуумом. Рассмотрим технологию производства регенеративного продукта в сушильной камере при вакуумировании и инфракрасном нагреве. При этом возникают следующие осложняющие факторы: вакуум – приборы и/или датчики регистрации веса должны без проблем работать под вакуумом, так как сигнальную часть приборов и/или датчиков необходимо герметично вывести из сушильной камер для обеспечения заданной глубины вакуума; температура – приборы и/или датчики должны выдерживать и сохранять работоспособность при температурах до 130 °C (по условиям технологии производства регенеративного продукта), изоляция сигнальных линий также должна выдерживать температуру до 130 °C; вибрация – как показывает практика эксплуатации весовых измерительных приборов в сушильных установках, даже незначительная вибрация может приводить к потере точности измерений. В производстве регенеративного продукта вакуумная камера закреплена на раме, на которой установлено дополнительное оборудование, в той или иной мере являющееся источником вибрации. При этом основным источником вибрации является вакуумный насос. Как показали измерения, наличие в системе крепления вакуумного насоса гасителей вибрации не исключает передачу вибраций на сушильную камеру и соответственно на измерительное оборудование.

Для выбора приборов и датчиков для измерения убыли веса в процессе сушки регенеративного материала в режиме реального времени рассмотрены следующие варианты: стандартные лабораторные электронные весы, тензодатчики и механические весы.

#### Экспериментальная часть

В качестве первого варианта рассматривались лабораторные электронные весы, работающие на основе преобразования механической силы (веса объекта) в электрический сигнал. К основным достоинствам таких весов для рассматриваемых условий можно отнести наличие платформы, выравниваемой по уровню, на которую помещается взвешиваемый объект; удобный цифровой дисплей, где отображается результат взвешивания и наличие памяти измерений с возможностью интерфейса с компьютером.

В процессе испытания лабораторных электронные весов в условиях вакуумной сушилки выявлены следующие основные недостатки: сильная чувствительность к ударам и вибрациям (в условиях измерений веса в сушильной камере лабораторные электронные весы выдают неточные показания при наличии даже незначительных вибраций); невозможность эксплуатации весов внутри вакуумной сушильной камеры при использовании инфракрасных нагревателей.

Соответственно, применение данного вида весов для исследования кинетики сушки и контроля технологического процесса в рассматриваемых условиях производства регенеративного продукта невозможно.

Во втором варианте анализировалось применение системы тензодатчиков, адаптированной для существующей конструкции сушильной камеры. Тензодатчики (тензометрические датчики) – устройства, которые преобразуют механическую деформацию (например, растяжение, сжатие или изгиб) в измеримый электрический сигнал. Они являются ключевыми компонентами в различных измерительных системах, особенно в весовом оборудовании. В основе работы тензодатчика лежит эффект тензорезистивности. Тензорезистор — чувствительный элемент, который изменяет свое электрическое сопротивление при деформации. Обычно он представляет собой тонкую металлическую фольгу, нанесенную на диэлектрическую подложку.

Когда на тензодатчик действует сила, он деформируется. Эта деформация приводит к изменению геометрических размеров тензорезистора (длины и поперечного сечения), что в свою очередь изменяет его электрическое сопротивление. Изменение сопротивления измеряется с помощью электрической схемы, обычно мостовой схемы Уитстона, преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный приложенной силе. Эта схема обеспечивает высокую точность и стабильность измерений в заданных условиях.

Также широкое применение находят полумостовые тензодатчики. Это разновидность тензодатчика, в котором используется не полный мост Уитстона из четырех тензорезисторов, а только его половина – два тензорезистора, что делает его более простым и экономичным в производстве.

Для исследования возможности применения тензодатчиков для непрерывного измерения веса в условиях вакуумной сушки регенеративного продукта выбраны полумостовые тензодатчики. По конструкции сушильной камеры кассета для сушки пластин в вакуумной камере устанавливается на металлические уголки. Для установки на них тензодатчиков разработаны, изготовлены и смонтированы

в камеру специальные уголки с широкой полкой. По краям уголков предусмотрены отверстия  $1,5 \times 1,5$  см для возможности компенсации свободной деформации тензодатчика. Четыре тензодатчика крепятся к уголкам с краев, с тем чтобы измерительная часть тензодатчика находилась по центру отверстия. Сигнальные линии от них выводятся из камеры через герморазъем, где соединяются в мост Уитстона и подключаются к АЦП для преобразования измеряемой величины ЭДС в значения веса и передачи последних на ПК.

Разработанная конструкция уголков с тензодатчиками была установлена в вакуумную камеру взамен стандартных неподвижных креплений кассет высушиваемого продукта, что должно позволить измерять вес высушиваемой пластины в режиме реального времени. После установки тензодатчиков в камеру и подключению их к АЦП и компьютеру проведено несколько циклов с нагревом и вакуумированием камеры с установленной в нее пустой кассетой для сушки регенеративных продуктов с целью оценки значений, полученных с тензодатчиков и дальнейшей их калибровки.

Сопротивление тензорезисторов зависит от температуры, поэтому необходимо провести программную термокомпенсацию показаний, получаемых с тензодатчиков. Проведено три цикла нагрева камеры совместно с вакуумированием, в каждом из которых получена кривая веса. В результате экспериментов отмечено нелинейное влияние вакуумированияи нагрева камеры на показатели тензодатчиков. На рисунке 1 показаны кривые изменения показаний тензодатчиков при измерении веса эталонной гири (не меняющей свой вес) в процессе вакуумирования и нагрева камеры. Как видно из графиков, при вакуумировании камеры значение веса, получаемое с тензодатчиков, начинает уменьшаться, далее при нагревании камеры вес начинает расти.

При этом разница в показаниях в конце цикла и между циклами для отдельных экспериментов (в данном случае три эксперимента) составляет порядка 10 г. При анализе полученных данных с таким разбросом значений между циклами не представляется возможным сделать программную термокомпенсацию влияния вакуума и температуры на получаемые значения веса. В связи обнаруженным эффектом было решено отказаться от использования тензодатчиков для измерения веса высушиваемого регенеративного продукта в режиме реального времени в условиях вакуума.

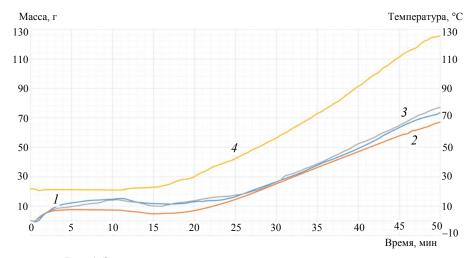


Рис. 1. Зависимость показаний тензодатчиков от температуры: 1, 2, 3 – изменение массы – первый, второй и третий эксперименты соответственно; 4 – изменение температуры в камере

Рассмотрим третий вариант — механические весы, в которых используются пружины, рычаги или противовесы. В условиях работы в сушильной камере механические весы обладают следующими преимуществами: не требуют подключения к источнику питания, имеют простую конструкцию, могут эксплуатироваться при высокой влажности, температуре или запыленности. Конструкция механических чашечных весов была модернизирована. Для измерения убыли веса в реальном времени в процессе вакуумной сушки на вал индикации веса установлен датчик угла поворота.

Для автоматического считывания показаний положения вала весов применялся бесконтактный электронный датчик угла поворота AS5600, использующий магнитное поле для определения положения. Он относится к категории абсолютных энкодеров, то есть выдает абсолютное значение угла, а не относительное, как инкрементальные энкодеры. Это значит, что после выключения и включения питания датчик сразу знает свое текущее положение. Данное устройство использует четыре датчика Холла для измерения магнитного поля, создаваемого магнитом, расположенным на вращающейся оси. Измеренное магнитное поле преобразуется в цифровой код, соответствующий углу поворота. Основные достоинства применяемого датчика в условиях исследований кинетики вакуумной сушки: бесконтактное измерение – отсутствие механического контакта исключает износ и обеспечивает долгий срок службы; абсолютный энкодер – сохраняет информацию об угле поворота даже после отключения питания; высокое разрешение – 12-битный АЦП обеспечивает 4096 шагов на оборот, что соответствует угловому разрешению 0,088°; программируемый – возможность настройки параметров, таких как нулевое положение и режим вывода; широкий диапазон рабочих температур 40 ...120 °C; устойчивость к внешним магнитным полям.

Для крепления датчика на вал весов изготовлен специальный пластиковый корпус (использовалась технология 3D-печати). В передней части корпуса напротив микросхемы расположено отверстие, где запрессована латунная втулка, используемая в качестве подшипника скольжения для вала, на одном конце которого закреплен магнит, другим концом вал закрепляется на штоке стрелки весов.

Вал изготовлен из фторопласта для уменьшения теплопередачи от весов к магниту. Корпус датчика угла теплоизолирован в 2 слоя и закреплен на основании весов. Сигнальные линии от датчика изготовлены из проводов с термостой-кой фторопластовой изоляцией и помещены дополнительно в медную оплетку. Сигнальные линии выведены из камеры посредством гермоввода и подключены через микроконтроллер к компьютеру для отображения и регистрации показаний.

Корпус весов приварен к специальному основанию, для повышения устойчивости и возможности установки весов по уровню. Сверху вместо стандартной чаши приварена нижняя решетка кассеты. Весы установлены в вакуумную камеру. Схема механических весов с датчиком угла поворота представлена на рис. 2.

Механическая часть весов позволяет проводить измерения веса образцов в диапазоне 1...5 кг. Как показали испытания откалиброванных модернизированных весов с датчиком угла поворота, чувствительность новых весов составляет 1 г.

Для испытания разработанных весов проведены циклы экспериментов с нагревом (20, 60, 100, 130 °C) и вакуумированием (при таких же температурах) сушильной камеры по определению веса эталонного образца (гиря 50 г) и пластины регенеративного продукта, изменяющего вес в течение процесса сушки.

Результаты экспериментов по измерению веса эталонного образца на модернизированных механических весах при рассматриваемых режимах работы сушильной камеры показали отсутствие влияния вакуумирования и нагрева в диапазонах изменения технологических параметров производства регенеративного продукта. Вес образца (50 г) до нагрева и после не изменился, погрешность составила 0 %.

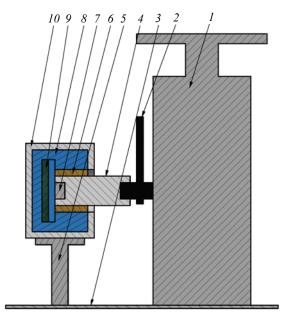


Рис. 2. Схема механических весов с датчиком угла поворота:

1 — корпус; 2 — вал со стрелкой; 3 — основание; 4 — фторопластовый вал; 5 — стойка для крепления датчика угла поворота; 6 — латунная втулка; 7 — магнит; 8 — корпус датчика угла поворота; 9 — датчик угла поворота; 10 — теплоизоляция

Таблица 1 Результаты испытаний модернизированных механических весов при сушке пластины регенеративного продукта при нагреве и вакуумировании камеры

Номер эксперимента	$g_1, \Gamma$	g2, г	$\Delta_1$ , %	<i>g</i> 3, г	g4, г	$\Delta_2$ , %
1	456,3	455	0,28	187	188,2	0,64
2	454,1	453	0,24	183	184,1	0,60
3	459,8	457	0,61	188	187,9	0,05
4	461,7	459	0,58	189	187,9	0,58
5	451,3	450	0,29	179	180,4	0,78

Для проверки точности модернизированных механических весов при получении кривой сушки пропитанную пластину взвешивали отдельно на лабораторных весах (значение  $g_1$ ), затем устанавливали пластину на весы в сушильную камеру и считывали значение веса пластины с механических весов  $g_2$ . Далее проводили монтаж пластины в оснастку (вес оснастки составляла 3255 г), вакуумирование и нагрев камеры. В процессе сушки пластины регистрировали убыль веса. По окончании процесса сушки записывали значение веса высушенной пластины с механических весов без учета веса оснастки  $g_3$ . Затем извлекали пластину из оснастки и взвешивали ее отдельно на лабораторных весах (значение  $g_4$ ). Результаты экспериментов по измерению веса высушиваемой пластины при вакуумировании и нагреве камеры представлены в табл. 1: погрешность измерения веса высушиваемого образца до сушки  $\Delta_1$  не превышает 0,61 %, после проведения процесса сушки  $\Delta_2$  — не превышает 0,78 %.

#### Заключение

Для получения достоверной кривой сушки при исследовании кинетики вакуумной сушки регенеративного продукта испытаны лабораторные электронные весы, специализированные весы, разработанные на основе применения тензодатчиков и модернизированные механические весы. Показано, что применение стандартных лабораторных электронных весов и специализированных весов на тензодатчиках не позволяет получить корректные данные по убыли веса при сушке регенеративного продукта в вакууме. Разработана конструкция модернизированных механических весов, которая проводит измерения веса образцов в диапазоне 1...5 кг с чувствительностью до 1 г, не испытывая при этом влияния вакуумирования и нагрева сушильной камеры. Разработанная конструкция весов может быть рекомендована для использования как в исследованиях кинетики сушки регенеративного продукта, так и в промышленном производстве регенеративного продукта для контроля веса во всем цикле производства, от стадии пропитки до стадии упаковки.

#### Список литературы

- 1. Еськов, В. А. Регенеративный материал с улучшенными характеристиками для дымозащитного капюшона / В. А. Еськов, Р. В. Дорохов, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. -2024. Т. 30, № 1. С. 122-129. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.122-129
- 2. Пат. на полезную модель № 185705 Российская Федерация, МПК А62В 7/08 (2006.01). Изолирующий дыхательный аппарат / Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю., Еськов В. А., Рязанов И. В. ; ОАО «Корпорация «Росхимзащита». № 2018131780 ; заявл. 03.09.18 ; опубл. 14.12.18, Бюл. № 35. 15 с.
- 3. Еськов, В. А. Влияние процесса сушки на качество регенеративного продукта на основе надпероксида калия / В. А. Еськов, А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2023. Т. 16, № 4. С. 597 602. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.597-602
- 4. Кинетика взаимодействия диоксида угдиссерлерода с надпероксидом калия / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий [и др.] // Химическая физика. -2007. Т. 26, № 10. С. 67 70.
- 5. Дорохов, Р. В. Аппаратурно-технологическое оформление процесса синтеза регенеративного продукта на матрице с улучшенными хемосорбционными характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Дорохов Роман Викторович. Тамбов, 2007. 187 с.

### Features of Weight Measurement during the Process of Drying a Regenerative Product in Vacuum

V. A. Eskov<sup>1,2</sup>, A. N. Pakhomov<sup>1</sup>⊠

Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, TSTU (1), panpost@yandex.ru; JSC "Roskhimzashchita" (2),Tambov, Russia

**Keywords:** vacuum; scales; angle sensor; drying kinetics; regenerative product; drying; strain gauge.

**Abstract:** The article considers the possibilities of using standard laboratory electronic scales, scales based on a strain gauge system and modernized mechanical scales in a vacuum drying chamber. It is shown that standard laboratory electronic scales and specialized scales on strain gauges do not allow obtaining correct data on weight loss during drying of the regenerative product in a vacuum. A design of

mechanical scales has been developed that excludes the influence of vacuumization and heating of the drying chamber, allowing to measure the weight of dried samples in the range from 1 to 5 kg with a sensitivity of up to 1 g.

#### References

- 1. Yes'kov V.A., Dorokhov R.V., Pakhomov A.N. [Regenerative material with improved characteristics for a smoke-protective hood], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 122-129. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.122-129 (In Russ., abstract in Eng.)
- 2. Dorokhov R.V., Ferapontov Yu.A., Plotnikov M.Yu, Yes'kov V.A., Ryazanov I.V. *Izoliruyushchiy dykhatel'nyy apparat* [Isolating breathing apparatus], Russian Federation, 2018, Pat. for utility model 185705. (In Russ.)
- 3. Yes'kov V.A., Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts. [Influence of the drying process on the quality of a regenerative product based on potassium superoxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 597-602. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.597-602 (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretskiy S.I. [et al.], [Kinetics of interaction of carbon disulfide dioxide with potassium superoxide], *Khimicheskaya fizika* [Chemical Physics], 2007, vol. 26, no. 10, pp. 67-70. (In Russ., abstract in Eng.)
- 5. Dorokhov R.V. *PhD of Candidate's thesis* (Engineering), Tambov, 2007, 187 p. (In Russ.)

### Besonderheiten der Gewichtsmessung beim Trocknen eines regenerativen Produkts im Vakuum

**Zusammenfassung:** Es sind die Möglichkeiten der Verwendung von standardmäßigen elektronischen Laborwaagen, Waagen auf Basis eines Dehnungsmessstreifensystems und modernisierten mechanischen Waagen in einer Vakuumtrocknungskammer betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass herkömmliche elektronische Laborwaagen und Spezialwaagen mit Dehnungsmessstreifen keine korrekten Daten zum Gewichtsverlust während der Trocknung des regenerativen Produkts im Vakuum liefern. Für mechanische Waagen ist ein Design entwickelt, das den Einfluss auf das Absaugen und Erwärmen der Trockenkammer eliminiert und so Gewichtsmessungen getrockneter Proben im Bereich von 1 bis 5 kg mit einer Empfindlichkeit von bis zu 1 g ermöglicht.

#### Caractéristiques de la mesure du poids dans le processus de séchage du produit régénérateur sous vide

**Résumé:** Eest examinée la possibilité d'utiliser des balances électroniques de laboratoire standard, des balances construites à la base d'un système de cellule de charge et des balances mécaniques améliorées dans la chambre de séchage sous vide. Est démontré que les balances électroniques de laboratoire standard et les balances spécialisées sur les jauges de contrainte ne permettent pas d'obtenir des données correctes sur la perte de poids lors du séchage du produit régénérateur sous vide. Est élaborée la conception des balances mécaniques qui élimine les effets de l'aspiration et du chauffage de la chambre de séchage, permettant de mesurer le poids des échantillons prélevés dans la plage de 1 à 5 kg avec une sensibilité allant jusqu'à 1 G.

Авторы: *Еськов Владимир Александрович* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; старший научный сотрудник АО «Росхимзащита», Тамбов, Россия; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.118-128

# КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОНАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ ИОНОВ $\mathbf{Zn^{2+}}$ , $\mathbf{Ni^{2+}}$ , $\mathbf{Cu^{2+}}$ , $\mathbf{Co^{2+}}$

Д. С. Лазарев<sup>1</sup>, И. В. Хорохорина<sup>2 $\boxtimes$ </sup>

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

**Ключевые слова:** вольтамперная характеристика; коэффициент задержания; мембрана; нанофильтрация; нейронная сеть; удельный выходной поток; электропроводность.

**Аннотация:** Изучена кинетика процесса электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств, содержащих ионы  $\mathrm{Zn}^{2+}$ ,  $\mathrm{Ni}^{2+}$ ,  $\mathrm{Cu}^{2+}$ ,  $\mathrm{Co}^{2+}$ . Экспериментально исследованы такие характеристики процесса, как вольтамперометрия, электропроводность, коэффициент задержания мембраны и выходной удельный поток растворителя. На основе полученных экспериментальных данных разработана искусственная нейронная сеть для прогнозирования и расчета кинетических и электрохимических характеристик электронанофильтрационного извлечения компонентов из технологических растворов гальванических производств.

#### Ввеление

В современном мире, где проблемы окружающей среды становятся все более острыми, разработка эффективных методов очистки сточных вод является одним из приоритетных направлений исследований. Металлообрабатывающая промышленность, и в частности, гальванические производства, потребляют большие объемы воды [1-5]. Как следствие, образуются сточные воды, содержащие в значительном количестве загрязняющие вещества 1-2 классов опасности.

Перспективные методы обезвреживания таких сточных вод — мембранные и электромембранные технологии очистки воды, зарекомендовавшие себя не только в промышленности, но и в производстве питьевой и ультрачистой воды [5-11].

Электронанофильтрация – современный доступный метод очистки воды, позволяющий не только задержать целевые ионы, но и сконцентрировать технологические растворы. Исследования кинетических характеристик электронафильтрационной очистки сточных вод и технологических растворов от ионов тяжелых металлов представляют собой важный аспект для оценки эффективности данной технологии. Эффективность процесса напрямую зависит от таких параметров, как величина плотности тока, электропроводность, коэффициент задержания мембраны, выходной удельный поток растворителя.

В целях исследования основных параметров электромембранного разделения проведен эксперимент по очистке модельных растворов, имитирующих реальные сточные воды промышленных объектов г. Тамбова, содержащие ионы  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ . Основные характеристики модельных растворов приведены в табл. 1.

Таблица 1 Основные характеристики модельных растворов

Тип раствора	Состав раствора	Исследуемое вещество	Концентрация, мг/л	
Промышленные растворы, получае-мые в процессе нанесения гальванических покрытий	$\begin{array}{c} \text{CuSO}_4\\ \text{ZnSO}_4\\ \text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7\\ \text{NH}_4\text{Cl}\\ \text{H}_3\text{BO}_3\\ \text{CoSO}_4\\ \text{NiSO}_4 \end{array}$	Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>	90400	
Модельный раствор, содержащий:				
медь и цинк	CuSO <sub>4</sub> ZnSO <sub>4</sub>	Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	350	
никель и кобальт	NiSO <sub>4</sub> CoSO <sub>4</sub>	Ni <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>	150	

#### Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования кинетических характеристик электронанофильтрационного процесса разделения растворов проводились на лабораторной установке, основным элементом которой является электромембранная ячейка плоскокамерного типа (рис. 1). Для исследования выбраны следующие марки мембран отечественного производства: ОПМН-П, ОПМН-К.

Чтобы изучить кинетику электронанофильтрации, исследовались такие характеристики процесса, как вольтамперометрия, электропроводность  $\lambda$ , коэффициент задержания мембраны R и выходной удельный поток растворителя J. Изучение данных характеристик дает возможность контролировать процесс очистки, повышая его производительность.

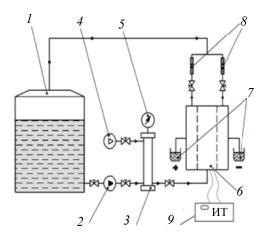


Рис. 1. Схема лабораторной электромембранной установки:

1 – емкость для исходного раствора;
 2 – насос-дозатор;
 3 – гидроаккумулятор;
 4 – компрессор;
 5 – манометр;
 6 – мембранная разделительная ячейка;
 7 – емкости для пермеата;
 8 – поплавковые ротаметры;
 9 – источник постоянного тока

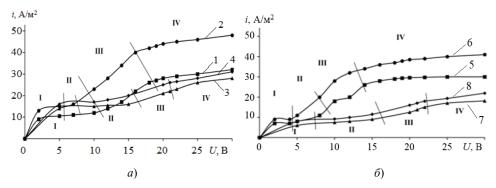


Рис. 2. Вольтамперная характеристика системы «мембрана – раствор»: a – растворы, содержащие ионы  $\operatorname{Zn}^{2+}(1-C_{\text{исх}}=0,3\text{ кг/м}^3; 2-C_{\text{исх}}=0,6\text{ кг/м}^3)$  и  $\operatorname{Ni}^{2+}(3-C_{\text{исх}}=0,3\text{ кг/м}^3; 4-C_{\text{исх}}=0,6\text{ кг/м}^3)$  – мембрана ОПМН-П;  $\delta$  – растворы, содержащие ионы  $\operatorname{Cu}^{2+}(5-C_{\text{исx}}=0,3\text{ кг/м}^3; 6-C_{\text{исx}}=0,6\text{ кг/м}^3)$  и  $\operatorname{Co}^{2+}(7-C_{\text{исx}}=0,3\text{ кг/м}^3; 8-C_{\text{исx}}=0,6\text{ кг/м}^3)$  – мембрана ОПМН-К

#### Обсуждение результатов

На рисунке 2 показана вольтамперная характеристика (**BAX**) мембранной системы, позволяющая оценить величину предельного электродиффузионного тока по ионам соли – параметр, важный для практического применения мембран.

Исследуемые технологические растворы являются проводниками второго рода. Так как протекание тока в таких электролитах всегда сопровождается химическими превращениями, на экспериментальных кривых (см. рис. 2) видно, что ВАХ имеет четыре участка с двумя волнами подъема тока: І – имеет линейную зависимость, характеризующую собой омическое изменение тока, обусловлен омическим сопротивлением обоих диффузионных слоев в неполяризованном состоянии и мембраны; II - «плато» предельного тока с резким увеличением потенциала ВАХ, который свидетельствует о снижении концентрации электролита у межфазной границы «мембрана – раствор» по сравнению с концентрацией в ядре потока; III – вторая волна подъема предельного тока (характерна для электромембранных систем), связанная с возникновением сопряженных эффектов концентрационной поляризации, где протекает процесс регенерации ионов Н и ОН<sup>-</sup>; IV – участок, в котором происходят структурные изменения в активном слое ионизированной мембраны. Каждый участок ВАХ содержит определенные сведения о мембранной системе и особенностях развития такого явления, как концентрационная поляризация, а угол наклона омического сегмента кривой может быть использован для оценки электрического сопротивления мембраны [12].

Анализируя ВАХ нанофильтрационных мембран, можно отметить зависимость предельного тока от концентрации ионов металла в растворе: с увеличением концентрации ионов металла возрастает величина предельного тока, который отвечает такому состоянию системы «аппарат — мембрана — раствор», при котором концентрация противоионов у поверхности мембраны падает практически до нуля и в то же время укорачивается участок «плато» предельного тока (II).

Анализ ВАХ позволил определить такой электрохимический параметр системы, как электропроводность раствора.

На рисунке 3 приведены зависимости электропроводности композиционной мембраны, полностью зависящие от количества содержащегося в ней вещества.

Во всех исследуемых растворах концентрации ионов металла не превышали 1 кг/м<sup>3</sup>, следовательно, данные растворы являются слабыми электролитами. С повышением концентрации в них ионов металла электропроводность мембраны

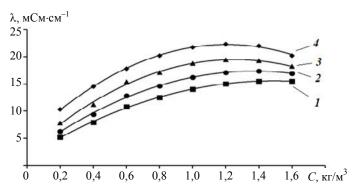


Рис. 3. Зависимость электропроводности композиционных мембран ОПМН-П и ОПМН-К от концентрации ионов металлов:

I –мембрана ОПМН-П, раствор  $\mathrm{Zn}^{2+},\ \mathrm{Cu}^{2+};\ 2$  – мембрана ОПМН-К, раствор  $\mathrm{Zn}^{2+},\ \mathrm{Cu}^{2+};\ 3$  – мембрана ОПМН-К, раствор  $\mathrm{Ni}^{2+},\ \mathrm{Co}^{2+};\ 4$  – мембрана ОПМН-П, раствор  $\mathrm{Ni}^{2+},\ \mathrm{Co}^{2+}$ 

возрастает, так как происходит генерация дополнительных носителей электрического заряда. Данный факт не противоречит общепринятым физическим законам.

Однако с дальнейшим увеличением концентрации возникает обратный эффект: степень диссоциации ионов начинает снижаться, что приводит к ухудшению электропроводности. Этот феномен можно объяснить влиянием ионной активности и взаимодействием ионов в растворе. При достижении определенного порога концентрации, количество свободных ионов не поддерживает необходимый уровень проводимости и электропроводность начинает деградировать, что и наблюдается на представленных зависимостях [13].

Определив оптимальную плотность тока для проведения процесса мембранного разделения для каждого типа мембран и растворов, следующим этапом был исследован коэффициента задержания мембран и удельный выходной поток растворителя.

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента задержания и удельного выходного потока от трансмембранного давлении для модельных растворов, содержащих катионы  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ .

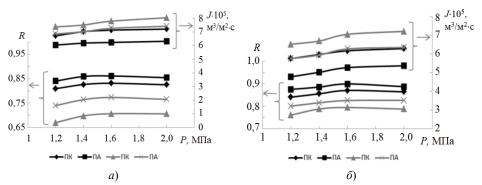


Рис. 4. Изменение задерживающей способности мембраны и удельного выходного потока растворителя в зависимости от трансмембранного давления при электронанофильтрационном разделении растворов, содержащих:

 $a-{\rm Zn}^{2+}$ ,  ${\rm Cu}^{2+}$  (черные – для мембраны ОПМН-П с плотностью тока  $i=36~{\rm A/m}^2$ , серые – для мембраны ОПМН-К с плотностью тока  $i=28~{\rm A/m}^2$ );  ${\it 6}-{\rm Nii}^{2+}$ ,  ${\rm Co}^{2+}$  (черные – для мембраны ОПМН-П с плотностью тока  $i=28~{\rm A/m}^2$ ), серые – для мембраны ОПМН-К с плотностью тока  $i=21~{\rm A/m}^2$ ; ПК – прикатодные мембраны; ПА – прианодные мембраны

Для нанофильтрационных мембран задерживающая способность по всем видам исследуемых ионов в начальном периоде возрастает. Вследствие увеличения трансмембранного давления повышается сила воздействия на рабочую поверхность мембраны, которая в результате деформационных изменений сжимается и, как следствие, уплотняется. После достижения значений трансмембранного давления более 1,6 МПа наблюдается снижение коэффициента задержания. Это связано с постепенным возрастанием количества ионов у активной поверхности мембраны в примембранном слое, где происходит проскок иона вместе с растворителем [14, 15].

Аналогично можно заметить, что по всем исследуемым ионам и мембранам с повышением трансмембранного давления над поверхностью мембраны возрастает удельный выходной поток по растворителю, так как является главной движущей силой процесса разделения.

В условиях, когда трансмембранное давление превышает допустимые значения, происходит значительное изменение в динамике процессов фильтрации. Учитывая, что давление является главным фактором, обеспечивающим движение растворителя через мембрану, возрастает не только скорость потока, но и качество разделения компонентов. При этом важно отметить, что различные ионы и мембраны реагируют на изменение давления по-разному, что приводит к вариациям в выходном потоке. Различия в производительности нанофильтрационных мембран ОПМН-П и ОПМН-К связаны с их пористостью и веществом активного слоя мембран (ОПМН-К – поливиниловый спирт; ОПМН-П – пиперазин).

Стоит отметить, что разделяемый раствор, являясь проводником второго рода, при проведении экспериментального исследования с наложением электрического поля нагревается, что вносит вклад в увеличение удельного выходного потока через прикатодные и прианодные мембраны. Также с увеличением давления мембрана подвергается дополнительным механическим воздействиям, что может приводить к ее структурным изменениям [16, 17].

На основе проведенных экспериментальных исследований разработана искусственная нейронная сеть (ИНС) для прогнозирования и расчета кинетических и электрохимических характеристик электронанофильтрационного извлечения ионов металлов из технологических растворов гальванических производств. Искусственная нейронная сеть является важным инструментом для изучения и контроля электрохимических процессов, происходящих в системе «мембрана – раствор». Она позволяет получить информацию о состоянии системы и оптимизировать ее работу для достижения желаемых результатов. На рисунках 5 и 6 представлены интерфейсы разработанных ИНС.

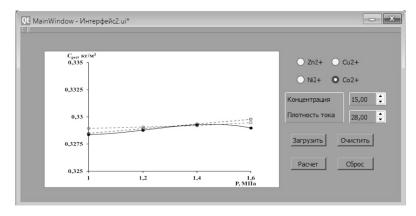


Рис. 5. Интерфейс ИНС для прогнозирования концентрации ионов от давления при постоянной плотности тока

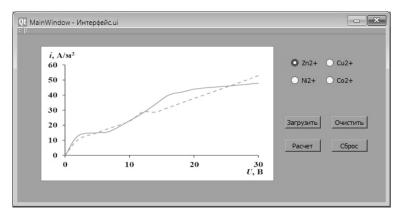


Рис. 6. Интерфейс ИНС для прогнозирования плотности тока от напряжения в системе «мембрана – раствор»

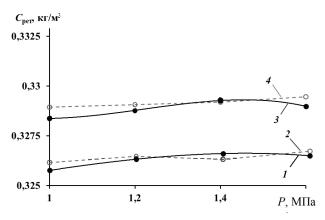


Рис. 7. Зависимости концентрации ионов  $\mathrm{Co}^{2^+}$  в ретентате от трансмембранного давления при разделении технологического раствора, содержащего катионы  $\mathrm{Co}^{2^+}$  и  $\mathrm{Ni}^{2^+}$ , при плотности тока  $i=28~\mathrm{A/m}^2$ :

1, 3 – экспериментальные данные соответственно для мембран ОПМН-К и ОПМН-П; 2, 4 – спрогнозированные ИНС соответственно для мембран ОПМН-К и ОПМН-П

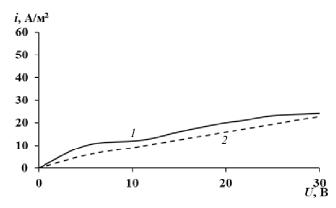


Рис. 8. Зависимость плотности тока от напряжения электрохимической баромембранной системы для ионизированной мембраны ОПМН-К при концентрировании растворов ОАО «Электроприбор» (Тамбов), содержащих ионы Со<sup>2+</sup>:

1, 2 – результаты соответственно экспериментальных исследований и рассчитанные нейронной сетью

Для проверки адекватности ИНС проведено сравнение экспериментально полученных и спрогнозированных с помощью ИНС зависимостей концентраций ионов  $\mathrm{Co}^{2+}$  от давления при разделении технологического раствора, содержащего катионы  $\mathrm{Co}^{2+}$  и  $\mathrm{Ni}^{2+}$ , с помощью мембран ОПМН-К и ОПМН-П (рис. 7), и плотности тока от напряжения электрохимической баромембранной системы для ионизированной мембраны ОПМН-К (рис. 8).

Результаты исследования (см. рис. 7) показывают линейное возрастание всех исследуемых значений трансмембранного давления  $\Delta P$  (1...1,6 МПа) для обоих типов мембран. Рассчитанные ИНС значения концентрации  $\mathrm{Co}^{2+}$  в ретентате адекватно совпадают с экспериментально полученными данными по концентрации  $\mathrm{Co}^{2+}$  в ретентате после процесса нанофильтрационного разделения многокомпонентного раствора, содержащего катионы  $\mathrm{Co}^{2+}$  и  $\mathrm{Ni}^{2+}$ . Расхождение значений варьируется в пределах 5 %.

Полученные с помощью нейронной сети результаты ВАХ (см. рис. 8) также хорошо коррелируются с экспериментальными данными. Расхождение значений варьируется в пределах 10 %.

Одним из основных преимуществ нейронных сетей является их способность обучаться на больших объемах данных и выявлять сложные нелинейные зависимости между входными и выходными переменными [18, 19]. Благодаря этому нейронные сети могут адаптироваться к различным условиям и типам сточных вод, что делает их универсальным инструментом для прогнозирования результатов очистки.

#### Заключение

На основании проведенных исследований получены экспериментальные данные и зависимости по исследованиям кинетических и электрохимических параметров электромембранного извлечения ионов металлов кобальта, никеля, цинка и меди из технологических растворов гальванических производств. Применены цифровые технологии на основе нейронных сетей для прогнозирования вольтамперных и кинетических характеристик электронанофильтрационного разделения водных растворов гальванических производств, содержащих ионы тяжелых металлов. Благодаря высокой точности прогнозирования и хорошей корреляции с экспериментальными данными, нейронные сети помогают улучшить процессы очистки сточных вод и сделать их более эффективными и экологически безопасными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования  $P\Phi$  в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

#### Список литературы

- 1. Вертинский, А. П. Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика / А. П. Вертинский // Инновации и инвестиции. 2019. № 1. С. 175-182.
- 2. Семенов, А. Ф. Обзор современных методов очистки сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов / А. Ф. Семенов, Е. Ю. Либерман, В. А. Колесников // Успехи в химии и химической технологии. -2020. Т. 34, № 4(227). С. 83-85.

- 3. Enhanced chitosan beads-supported Fe0 -nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers / T. Liu, X. Yang, Z.-L. Wang, X. Yan // Water Research. 2013. Vol. 47, No. 17. P. 6691 6700. doi: 10.1016/j.watres.2013.09.006
- 4. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов ; под ред. проф. В. Н. Кудрявцева. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Глобус, 2002. 352 с.
- 5. Barakat, M. A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater / M. A. Barakat // Arabian Journal of Chemistry. -2011. No. 4. P. 361 377. doi: 10.1007/s00253-016-7646-x
- 6. Макарчук, Г. В. Мембранные методы очистки воды / Г. В. Макарчук, Н. А. Мамаева, К. Д. Шиманский // Наука и военная безопасность. -2022. -№ 1(28). C. 92 97.
- 7. Physicochemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals / T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W. H. Lo, S. Babel // Journal of Chemical Engineering. 2006. No. 118. P. 83 98. doi: 10.1016/j.cej.2006.01.015
- 8. Волчек, К. А. Комбинированные мембранные процессы очистки и переработки воды / К. А. Волчек, Г. Г. Каграманов, Е. Н. Фарносова // Химическая промышленность сегодня. -2010. -№ 7. C. 43 50.
- 9. Хорохорина, И. В. Мембранные технологии экологичные способы очистки сточных вод / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, С. М. Бидуля // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2021. № 3(81). С. 37 43. doi: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043
- 10. Тураев, Д. Ю. Технология очистки промывной воды гальванического производства от ионов кадмия методом мембранного и безмембранного электролиза / Д. Ю. Тураев, В. А. Колесников, А. Н. Попов // Теоретические основы химической технологии. -2020. Т. 54, № 1. С. 75 82. doi: 10.31857/S0040357120010224
- 11. Абоносимов, Д. О. Применение мембранных технологий в очистке сточных вод гальванопроизводств / Д. О. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -2014. Т. 20, № 2. С. 306-313.
- 12. Хорохорина, И. В. Влияние концентрации ионов  $Zn^{2+}$  и  $Cu^{2+}$  на вольтамперные характеристики и электропроводность мембран в процессе электромембранного разделения стоков металлообрабатывающих производств / И. В. Хорохорина / Вестник технологического университета. − 2020. − Т. 23, №2. − С. 46 − 49.
- 13. Гнусин, Н. П. Электродиффузия через неоднородную ионообменную мембрану / Н. П. Гнусин, Н. А. Кононенко, С. Б. Паршиков // Электрохимия. 1994. Т. 30, № 1. С. 35 40.
- 14. Извлечение цинка, меди, никеля и кобальта из сточных вод гальванических производств методом электронанофильтрации / С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, К. В. Шестаков, Д. С. Лазарев // Журнал прикладной химии. -2021. Т. 94, № 8. С. 1059 1064. doi: 10.31857/S0044461821080120
- 15. Электронанофильтрационная очистка сточных вод машиностроительных производств от некоторых ионов / Р. В. Попов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев, В. М. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23, № 2. С. 288 —294. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.288-294
- 16. Структурные характеристики мембран и кинетические зависимости электронанофильтрационной очистки сточных вод процесса латунирования / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, Ю. М. Головин, Д. С. Лазарев // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. − 2020. − Т. 63, № 7. − С. 95 − 102. doi: 10.6060/ivkkt.20206307.6117

- 17. Iritani, E. Compression and expansion properties of filter cake accompanied with step change in applied pressure in membrane filtration / E. Iritani, N. Katagiri, G. Inagaki // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 198. P. 3 9. doi: 10.1016/j.seppur.2016.11.067
- 18. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования рН / В. Н. Штепа, В. А. Кудинов, О. Н. Прокопеня, Э. Н. Муслимов // Вестник Брестского государственного технического университета. − 2024. № 1(133). С. 149 155.
- 19. Hamed, M. M. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks / M. M. Hamed, M. G. Khalafallah, E. A. Hassanien // Environmental Modelling & Software. 2004. Vol. 19, No. 10. P. 919 928. doi: 10.1016/j.envsoft.2003.10.005

## Kinetic Characteristics of Electro-Nanofiltration Purification of Technological Solutions of Galvanic Production from Ions Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>

D. S. Lazarev<sup>1</sup>, I. V. Khorokhorina<sup>2</sup>

Departments: Mechanics and Engineering Graphics (1); Nature Management and Environment Protection, kotelnikovirina@yandex.ru (2), TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** current-voltage characteristic; retention coefficient; membrane; nanofiltration; neural network; specific output flux; electrical conductivity.

**Abstract:** The kinetics of the process of electro-nanofiltration purification of process solutions of galvanic production containing ions  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  was studied. Such characteristics of the process as voltammetry, electrical conductivity, membrane retention coefficient and output specific flow of the solvent were experimentally studied. Based on the obtained experimental data, an artificial neural network was developed for forecasting and calculating the kinetic and electrochemical characteristics of electro-nanofiltration extraction of components from process solutions of galvanic production.

#### References

- 1. Vertinskiy A.P. [Modern methods of wastewater treatment: application features and problems], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2019, no. 1, pp. 175-182. (In Russ., abstract in Eng.)
- 2. Semenov A.F., Liberman Ye.Yu., Kolesnikov V.A. [Review of modern methods of wastewater treatment in galvanic industries from heavy metal ions], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2020, vol. 34, no. 4(227), pp. 83-85. (In Russ., abstract in Eng.)
- 3. Liu T., Yang X., Wang Z.-L., Yan X. Enhanced chitosan beads-supported Fe0 nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers, *Water Research*, 2013, vol. 47, no. 17, pp. 6691-6700. doi: 10.1016/j.watres.2013.09.006
- 4. Vinogradov S.S.; Kudryavtsev V.N. (Ed.) *Ekologicheski bezopasnoye gal'vanicheskoye proizvodstvo* [Environmentally safe galvanic production], Moscow: Globus, 2002, 352 p. (In Russ.)

- 5. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater, *Arabian Journal of Chemistry*, 2011, no. 4, pp. 361-377. doi: 10.1007/s00253-016-7646-x
- 6. Makarchuk G.V., Mamayeva N.A., Shimanskiy K.D. [Membrane methods of water purification], *Nauka i voyennaya bezopasnost'* [Science and military security], 2022, no. 1(28), pp. 92-97. (In Russ., abstract in Eng.)
- 7. Kurniawan T.A., Chan G.Y.S., Lo W.H., Babel S. Physicochemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Journal of Chemical Engineering*, 2006, no. 118, pp. 83-98. doi: 10.1016/j.cej.2006.01.015
- 8. Volchek K.A., Kagramanov G.G., Farnosova Ye.N. [Combined membrane processes for water purification and recycling], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2010, no. 7, pp. 43-50. (In Russ., abstract in Eng.)
- 9. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bidulya S.M. [Membrane technologies environmentally friendly methods of wastewater treatment], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 3(81), pp. 37-43. doi: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043 (In Russ., abstract in Eng.)
- 10. Turayev D.Yu., Kolesnikov V.A., Popov A.N. [Technology of purification of galvanic production wash water from cadmium ions by membrane and membraneless electrolysis], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2020, vol. 54, no. 1, pp. 75-82. doi: 10.31857/S0040357120010224 (In Russ., abstract in Eng.)
- 11. Abonosimov D.O., Lazarev S.I. [Application of membrane technologies in wastewater treatment from galvanic industries], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 306-313. (In Russ., abstract in Eng.)
- 12. Khorokhorina I.V. [Effect of Zn<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> ion concentration on the current-voltage characteristics and electrical conductivity of membranes in the process of electromembrane separation of metalworking industry wastewater], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2020, vol. 23, no. 2, pp. 46-49. (In Russ., abstract in Eng.)
- 13. Gnusin N.P., Kononenko N.A., Parshikov S.B. [Electrodiffusion through a non-uniform ion-exchange membrane], *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 1994, vol. 30, no. 1, pp. 35-40. (In Russ., abstract in Eng.)
- 14. Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Shestakov K.V., Lazarev D.S. [Extraction of zinc, copper, nickel and cobalt from wastewater of galvanic industries by the method of electron-nanofiltration], *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 2021, vol. 94, no. 8, pp. 1059-1064. doi: 10.31857/S0044461821080120 (In Russ., abstract in Eng.)
- 15. Popov R.V., Lazarev S.I., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A., Dmitriyev V.M. [Electron-nanofiltration purification of wastewater from mechanical engineering industries from some ions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 288-294. doi: 10.17277/ vestnik.2017.02.pp.288-294 (In Russ., abstract in Eng.)
- 16. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Lazarev D.S. [Structural characteristics of membranes and kinetic dependencies of electron-nanofiltration treatment of wastewater from the brass plating process], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2020, vol. 63, no. 7, pp. 95-102. doi: 10.6060/ivkkt.20206307.6117 (In Russ., abstract in Eng.)
- 17. Iritani E., Katagiri N., Inagaki G. Compression and expansion properties of filter cake accompanied with step change in applied pressure in membrane filtration, *Separation and Purification Technology*, 2018, vol. 198, pp. 3-9. doi: 10.1016/j.seppur.2016.11.067

18. Shtepa V.N., Kudinov V.A., Prokopenya O.N., Muslimov E.N. [Predictive control of the biological wastewater treatment process based on neural network pH forecasting], *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Brest State Technical University], 2024, no. 1(133), pp. 149-155. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Hamed M.M., Khalafallah M.G., Hassanien E.A. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks, *Environmental Modelling & Software*, 2004, vol. 19, no. 10, pp. 919-928. doi: 10.1016/j.envsoft.2003.10.005

## Kinetische Eigenschaften der Reinigung der technologischen Lösungen der galvanischen Produktion durch Elektronen-Nanofiltration aus Ionen Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>

**Zusammenfassung:** Es ist die Kinetik des Prozesses der Elektronen-Nanofiltrationsreinigung von technologischen Lösungen der galvanischen Produktion, die die Ionen Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup> enthalten, untersucht. Die folgenden Prozesseigenschaften sind experimentell untersucht: Volt-Amper-Metrie, elektrische Leitfähigkeit, Membranretentionskoeffizient und auslassspezifischer Lösungsmittelfluss. Basierend auf den erhaltenen experimentellen Daten ist ein künstliches neuronales Netzwerk zur Vorhersage und Berechnung der kinetischen und elektrochemischen Eigenschaften der Elektronen-Nanofiltrationsextraktion von Komponenten aus Prozesslösungen der galvanischen Produktion entwickelt.

## Caractéristiques cinétiques de la filtration d'électron des solutions de traitement de la production de galvanoplastie des ions Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>

**Résumé:** Est étudiée la cinétique du processus de la purification d'électron par filtration des solutions technologiques des productions galvaniques contenant des ions Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>. Sont étudiés expérimentalement les caractéristiques du procédé telles que la voltamétrie, la conductivité électrique, le coefficient de rétention de la membrane et le débit spécifique de sortie du solvant. A la base des données expérimentales obtenues, est mis au point un réseau neuronal artificiel pour prédire et calculer les caractéristiques cinétiques et électrochimiques de l'extraction électronanofiltration de composants à partir de solutions technologiques de production galvanique.

**Авторы:** *Лазарев Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Хорохорина Ирина Владимировна* – доктор технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

#### КИНЕТИКА АДСОРБЦИОННО-ЩЕЛОЧНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА МАРКИ ТП-22С

#### О. В. Черникова, А. В. Рухов, Е. Ю. Образцова⊠, Р. Ю. Павлинов

Кафедра «Химия и химические технологии», nikif83@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** адсорбционно-щелочная регенерация; гидродинамика; концентрация; отработанное масло; температура; энергия активации.

Аннотация: Рассмотрено влияние температуры, концентрации, частоты вращения мешалки на кинетику регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С предложенным адсорбционно-щелочным методом в емкостном аппарате с перемешивающим устройством. Оценено среднее значение энергии активации в процессе регенерации турбинного масла, что позволило рассчитать температурный коэффициент скорости химической реакции (коэффициент Вант-Гоффа). Показано, что в условиях реализации процесса регенерации турбинного масла наблюдается диффузионная область контроля. Установлено существенное влияние на кинетику регенерации турбинного масла частоты вращения перемешивающего устройства, что позволяет сделать вывод о внешнедиффузионной области контроля процесса.

#### Введение

Усиление требований к экологической безопасности и охране окружающей среды диктует все более жесткие стандарты качества современных смазочных материалов и методов их производства. В условиях ресурсосбережения ведущие мировые производители смазочных материалов интенсивно разрабатывают инновационные технологии регенерации отработанных нефтепродуктов.

Процесс регенерации отработанных масел – экологически безопасный метод переработки отходов в ценный ресурс. Для российской нефтеперерабатывающей отрасли наиболее актуальными являются следующие вопросы:

- создание стимулирующих механизмов для производителей, направленных на поддержку и развитие их деятельности в сфере таможенного регулирования;
- внедрение экономического регулирования, призванного способствовать ресурсосбережению и экологизации существующих производственных процессов;
- формирование благоприятных условий для замещения импортных дорогостоящих синтетических и полусинтетических товарных масел отечественными аналогами [1].

В целом потребление масел в РФ растет приблизительно на 1 % ежегодно. К 2030 году ожидается рост потребления масел на 18 % (до 1,6 млн т) по сравнению с объемом потребления 2012 г. [2]. По мнению авторов [3, 4], в целях сохранения энергобезопасности страны и насыщения российского рынка собственными маслами необходимо организовывать собственное производство масел для импортозамещения смазочных материалов, а также активное использование отработанных масел [5]. Организация и содержание пунктов сбора масла, хранение,

транспортировка, переработка – все это требует финансовых затрат. В реальности отработанное масло экономичнее регенерировать, чем утилизировать.

На современном этапе развития российской промышленности весьма важным и актуальным является вопрос вовлечения в производство вторичного сырья, а именно, отработанных масел, которые представляют собой сырьевую базу для получения ценных нефтепродуктов при надлежащей переработке. Выбор метода очистки отработанных масел определяется характером содержащихся в них загрязнений и продуктов старения: для одних масел достаточно простой очистки от механических примесей, для других — необходима глубокая переработка, иногда с использованием химических реагентов и сорбентов [6, 8]. К тому же при разработке способа очистки масел следует стремиться к внедрению малоотходных или безотходных технологий, так как необходимость утилизации отходов создает проблемы для предприятий [7].

#### Задачи исследования

Разработка промышленных процессов регенерации турбинного масла адсорбционно-щелочным методом и аппаратурного оформления для их реализации требует понимания механизма, области контроля и наличия информации о кинетике лимитирующей стадии. В связи с этим необходимо провести экспериментальное исследование влияния температуры и гидродинамики на процесс адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С с использованием цеолита NaX с нанесенным на его поверхность гидроксида калия концентрацией 0; 0,1; 0,5; 1,0; 5,0 масс. % от массы цеолита.

#### Методика эксперимента

Отработанное турбинное масло в количестве 150 г помещалось в химический стакан В-1-250 объемом 250 мл, установленный в жидкостный термостат LOIP LT-108, с точностью поддержания температуры 0,1 °С. После прогрева масла до рабочей температуры в него добавляли 15 г комплексного поглотителя. Перемешивание в стакане осуществлялось при помощи двухлопастной мешалки диаметром 55 мм, изготовленной из нержавеющей стали с верхним приводом IKA 20 digital. Экспериментальное исследование влияния концентрации КОН на кинетику изменения кислотного числа отработанного турбинного масла в процессе регенерации проводились в пять серий при частоте вращения привода мешалки 50 об/мин. Концентрация КОН в комплексном поглотителе от массы цеолита 5; 1; 0,5; 0,1 и 0 масс. %. Каждый эксперимент для индивидуального значения концентрации КОН воспроизводился 3 раза с последующим усреднением результатов.

При исследовании адсорбционно-щелочной регенерации образцы отбирались через 15, 30, 60, 90, 120 мин в зависимости от времени прибавления комплексного поглотителя. Кислотное число определяли по ГОСТ 5985–2022. Исходное значение кислотного числа отработанного турбинного масла  $T\Pi$ -22C – 0,36 мг  $KOH/\Gamma$ .

Исследование влияния температуры на процесс регенерации масла проводился при концентрации КОН в комплексном поглотителе в зависимости от массы сорбента (1 масс. %) при температурах 25, 28, 32 и 35 °C. Воспроизведение осуществлялось по двум независимым экспериментам с последующим усреднением.

Исследование влияния частоты вращения привода мешалки на кинетику процесса регенерации отработанного турбинного масла проводилось для комплексного поглотителя с содержанием КОН, равным 1 масс. % от массы сорбента, при температуре 25 °C. Воспроизведение осуществлялось по двум независимым экспериментам с последующим усреднением.

Сорбент готовился по следующей методике. Исходный цеолит NaX с размером сферических гранул 1,6...2,5 мм, средним размером пор 0,9...1,0 нм, средней удельной поверхностью по методу БЭТ 1030 м²/г прокаливался при температуре 450 °C в течение 4 ч, после чего охлаждался до комнатной температуры в эксикаторе. На следующем этапе по 50 г цеолита засыпали в галтовочную машину барабанного типа КТ-6808 с добавлением 2,5; 0,5; 0,25; 0,05 г КОН для получения модифицированного сорбента, содержащего 5; 1; 0,5; 0,1 масс. % щелочи. Диаметр призматического барабана 150 мм, время обработки 10 мин, реверс каждые 30 с. Полученный сорбент хранили в плотно закрывающихся полиэтиленовых контейнерах.

Диаметр зерна адсорбента приняли равным  $d_{\rm cp} = 2{,}00$  мм. При этом известно, что если диаметр зерен  $d_{\rm cp}$  менее 3 мм, то процесс лимитируется в области внешней диффузии [9, 10].

Данные для определения пористости и порозности сорбента – цеолита марки NaX, представлены ниже.

Диаметр частиц $d_{cp}$ , мм	2,00
Объем цеолита насыпной $V_{\rm hac}$ , м <sup>3</sup>	
Объем пор $V_{\text{пор}}$ , м <sup>3</sup>	$4,511\cdot10^{-5}$
Объем цеолита $V_{\rm H}$ , м <sup>3</sup>	$8.181 \cdot 10^{-9}$

Коэффициенты пористости ξ и порозности ε равны соответственно:

$$\xi = V_{\text{nop}} / V_{\text{II}} = 5,51 \cdot 10^{-5};$$
  
 $\varepsilon = V_{\text{nop}} / V_{\text{Hac}} = 2,21 \cdot 10^{-5}.$ 

#### Результаты исследования и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований установили зависимость изменения среднего значения кислотного числа отработанного турбинного масла от времени для сорбентов с разным содержанием щелочи КОН (рис. 1). Как видно, на начальном этапе (время обработки до 30 мин) кислотное число меняется поступательно, что подтверждает внешнедиффузионный процесс. Затем на следующем шаге (время обработки до 90 мин) разница в применяемых сорбентах практически отсутствует. При дальнейшей обработке модифицированные сорбенты показывают лучшую эффективность по удалению низкомолекулярных продуктов окисления.

Изучена кинетика изменения кислотного числа в процессе регенерации тур-бинного масла. Исследования проведены при четырех значений температур (25, 28, 32 и 35 °C), что позволило оценить значения энергии активации процесса. Кинетические зависимости раскисления отработанного масла при температуре процесса (25...35 °C) представлены на рис. 2.

Также установлена зависимость энергии активации от температуры (рис. 3) проведения процесса. Энергия активация определена для начального периода (15 мин от начала). Рассчитано среднеарифметическое значение по всем моментам времени забора проб ( $E_{\rm acp}$  = 6,68 кДж/моль). Полученные значения нехарактерны для реакций, протекающих в кинетической области, для которых  $E_{\rm a}$  должна находиться в пределах 50...150 кДж/моль.

Рассчитан температурный коэффициент скорости химической реакции (коэффициент Вант-Гоффа), который составил  $\gamma \approx 1,2$ . Это говорит о том, что диапазон экспериментальных температур 25...35 °C не оказал заметного влияния на процесс и скорость реакции в целом (рис. 4).

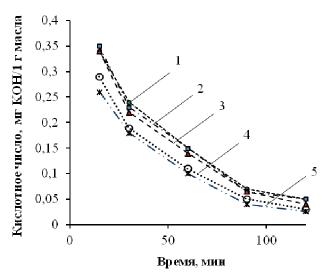


Рис. 1. Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С (частота вращения привода мешалки 50 об/мин) в зависимости от концентрации модифицированного сорбента – цеолита C, %:

1-0; 2-0.1; 3-0.5; 4-1.0; 5-5.0

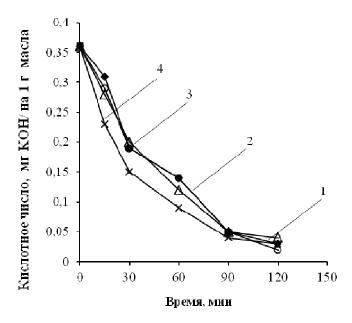


Рис. 2. Кинетика процесса раскисления отработанного турбинного маслаТП-22С при температуре процесса, °C: 1-25; 2-28; 3-32; 4-35

Расчет температурного коэффициента скорости химической реакции позволил установить следующее: процесс регенерации турбинного масла протекает при диффузионном контроле и его скорость преимущественно определяется гидродинамикой процесса. Следующим этапом работы было определение лимитирующей стадии процесса.

Для установления лимитирующей стадии диффузионного процесса изучали влияние частоты вращения привода мешалки на кинетику процесса адсорбционно-щелочной регенерации (рис. 5). Принято считать, что интенсивное перемешивание сорбционного раствора уравновешивает роль внешнего массопереноса из объема к поверхности зерна сорбента [11 – 13]. Полученная зависимость при назначенных частотах перемешивания позволила оценить вклад диффузии в кинетику процесса.

Как видно из графика (см. рис. 5), уменьшение кислотного числа зависит от интенсивности перемешивания потока жидкости, что приводит к возрастанию скорости обтекания каждой частицы сорбента маслом. Это происходит, когда общая скорость процесса определяется внешним массопереносом, который зависит от гидродинамического режима движения жидкости (турбулентности в потоке).

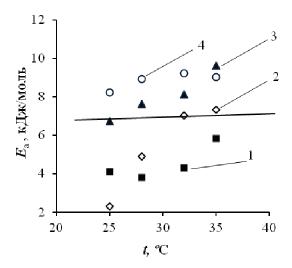


Рис. 3. Зависимость энергии активации от температуры процесса при концентрации модифицированного сорбента — цеолита C, %:  $I-0,1;\ 2-0,5;\ 3-1;\ 4-5$ 

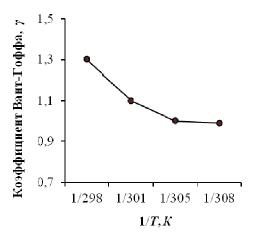


Рис. 4. Зависимость коэффициента Вант-Гоффа  $\gamma$  от температуры T

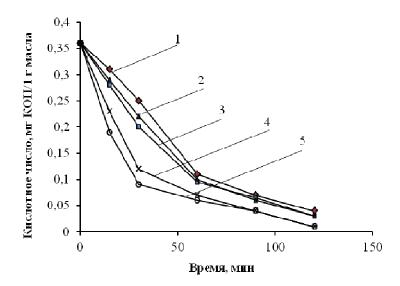


Рис. 5. Зависимость изменения кислотного числа при скоростях перемешивания, об/мин:

1-50; 2-100; 3-150; 4-250; 5-400

В таком случае процесс можно интенсифицировать, увеличивая турбулентность перемешивания [14]. Рациональная частота перемешивания в данном случае будет равна 250 об/мин при концентрация сорбента 1,0 %.

#### Заключение

Использование оригинального и достаточно простого метода регенерации отработанного турбинного масла дает возможность эффективно восстановить его функциональные характеристики. Экспериментальным способом показано, что при добавлении в качестве сорбента цеолита (модифицированного 1 масс. % КОН) в количестве 10 масс. % от массы регенерируемого масла нормативные показатели кислотного числа для турбинного масла ТП-22С достигаются при обработке в течение 90 мин. Установлено, что для цеолитов, модифицированных гидроксидом калия, процесс регенерации турбинного масла ТП-22С идет при диффузионном контроле.

Перспективным направлением продолжения данного исследования является определение влияния гидродинамической обстановки на скорость удаления низкомолекулярных органических кислот в процессе регенерации турбинного масла ТП-22С. Полученные экспериментальные данные позволят рассчитать значения коэффициента эффективной массоотдачи и определить коэффициент критериального уравнения при других концентрациях КОН.

#### Список литературы

- 1. Красиков, С. Б. Повышение эффективности использования топливноэнергетических ресурсов / С. Б. Красиков, Н. В. Оболенский. – Княгинино: НГИЭИ, 2014. – 158 с.
- 2. Масла и топлива СНГ: II ежегодная Международная конференция (Москва, Россия, 27 29 мая 2014). URL: https://ngv.ru/ic/ii-ezhegodnaya-mezhdunarodnaya-konferentsiya-masla-i-topliva-sng/ (дата обращения: 14.01.2025).

- 3. Технология производства смазочных масел и спецпродуктов : учеб. пособие / В. А. Тыщенко, И. А. Агафонов, А. А. Пимерзин [и др.]. М. : ЛЕНАНД,  $2014.-234\ c.$
- 4. Азиева, Р. Х. Разработка механизма управления нефтяным комплексом на мезоуровне / Р. Х. Азиева. Нальчик : Кабардино-Балкарский науч. центр РАН, 2010. 149 с.
- 5. Кожевников, В. А. Возможности и перспективы использования отработанных нефтепродуктов как топлива / В. А. Кожевников, С. К. Попов, К. В. Строгонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2022. -T. 333, № 8. -C. 192 204. doi: 10.18799/24131830/2022/8/3613
- 6. Адсорбционно-щелочной метод регенерации машинных масел на примере комплекной переработки отработанных синтетических моторных и турбинных масел / А. В. Рухов, А. Ю. Осетров, Н. М. Аль-Амери Саджа, О. В. Черникова, А. П. Спиридонова // Бутлеровские сообщения. -2023. Т. 73, № 3. С. 46 53. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-3-46
- 7. Шашкин, П. И. Регенерация отработанных нефтяных масел / П. И. Шашкин, И. В. Брай. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Химия, 1970. 304 с.
- 8. Пат. 2769605 Российская Федерация. МПК С10М 175/02. Способ регенерации отработанного масла / Рухов А. В., Бакунин Е. С., Образцова Е. Ю., Жабкина И. А., Рухов Ан. В., Аль-Амери С. Н. М., Истомин А. М. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ» ; заявл. 17.03.2021 ; опубл. 04.04.2022. Бюл. № 10. -5 с.
- 9. Дубинин, М. М. Адсорбция и пористость : учеб. пособие / М. М. Дубинин. М. : BAX3, 1972. 124 с.
- 10. Сорбционная очистка. Сорбция и адсорбция // ARGEL. URL: https://www.vo-da.ru/articles/sorbcionnaya-ochistka/sorbciya-adsorbciya (дата обращения: 24.12.2024).
- 11. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. М.: Химия, 1972. 496 с.
- 12. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками : пер. с польск. / под ред. И. А. Щупляка. Л. : Химия, Ленингр. отд-ние, 1975. 384 с.
- 13. Гельферих, Ф. Иониты. Основы ионного обмена / Ф. Гельферих. М. : Изд-во иностр. лит., 1962. 490 с.
- 14. Машины и аппараты химических производств: Основы теории и расчета / И. И. Чернобыльский, А. Г. Бондарь, Б. А. Гаевский [и др.]; под ред. И. И. Чернобыльского. М.; Киев: Машгиз. [Юж. отд-ние], 1959. 464 с.

### Kinetics of Adsorption Alkaline Regeneration of Spent Turbine Oil of TP-22S Brand

O. V. Chernikova, A. V. Rukhov, E. Yu. Obraztsova , R. Yu. Pavlinov

Department of Chemistry and Chemical Technology, nikif83@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** adsorption alkaline regeneration; hydrodynamics; concentration; spent oil; temperature; activation energy.

**Abstract:** The influence of temperature, concentration, and stirrer rotation frequency on the kinetics of regeneration of spent turbine oil of TP-22S brand by the proposed adsorption alkaline method in a capacitive apparatus with a stirrer is considered. The average value of activation energy in the process of turbine oil

regeneration was estimated, which allowed calculating the temperature coefficient of chemical reaction rate (Van't Hoff coefficient). It was shown that under the conditions of the process of turbine oil regeneration, a diffusion control region is observed. A significant effect of the rotation frequency of the mixing device on the kinetics of turbine oil regeneration was established, which allows us to draw a conclusion about the external diffusion control region of the process.

#### References

- 1. Krasikov S.B., Obolenskiy N.V. *Povysheniye effektivnosti ispol'zovaniya toplivno-energeticheskikh resursov* [Increasing the efficiency of fuel and energy resources use], Knyaginino: NGIEI, 2014, 158 p. (In Russ.)
- 2. available at: https://ngv.ru/ic/ii-ezhegodnaya-mezhdunarodnaya-konferentsiya-masla-i-topliva-sng/ (accessed 14 January 2025).
- 3. Tyshchenko V.A., Agafonov I.A., Pimerzin A.A. [et al.]. *Tekhnologiya proizvodstva smazochnykh masel i spetsproduktov: ucheb. posobiye* [Technology of production of lubricating oils and special products: textbook], Moscow: LENAND, 2014, 234 p. (In Russ.)
- 4. Aziyeva R.Kh. *Razrabotka mekhanizma upravleniya neftyanym kompleksom na mezourovne* [Development of a mechanism for managing the oil complex at the mesolevel], Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy nauch. tsentr RAN, 2010, 149 p. (In Russ.)
- 5. Kozhevnikov V.A., Popov S.K., Strogonov K.V. [Possibilities and Prospects for Using Waste Oil Products as Fuel], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. *Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2022, vol. 333, no. 8, pp. 192-204. doi: 10.18799/24131830/2022/8/3613 (In Russ., abstract in Eng.)
- 6. Rukhov A.V., Osetrov A.Yu., Al'-Ameri Sadzha N.M., Chernikova O.V., Spiridonova A.P. [Adsorption-alkaline method of regeneration of machine oils on the example of integrated processing of waste synthetic motor and turbine oils], *Butlerovskiye soobshcheniya* [Butlerov communications], 2023, vol. 73, no. 3, pp. 46-53. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-3-46 (In Russ., abstract in Eng.)
- 7. Shashkin P.I., Bray I.V. *Regeneratsiya otrabotannykh neftyanykh masel* [Regeneration of waste petroleum oils], Moscow: Khimiya, 1970, 304 p. (In Russ.)
- 8. Rukhov A.V., Bakunin Ye.S., Obraztsova Ye.Yu., Zhabkina I.A., Rukhov An.V., Al'-Ameri S.N.M., Istomin A.M. *Sposob regeneratsii otrabotannogo masla* [Method for regenerating waste oil], Russian Federation, 2022, Pat. 2769605 (In Russ.)
- 9. Dubinin M.M. *Adsorbtsiya i poristost': ucheb. posobiye* [Adsorption and porosity: textbook], Moscow: VAKhZ, 1972, 124 p. (In Russ.)
- 10. available at: https://www.vo-da.ru/articles/sorbcionnaya-ochistka/sorbciya-adsorbciya (accessed 24 December 2024).
- 11. Planovskiy A.N., Nikolayev P.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoy i neftekhimicheskoy tekhnologii* [Processes and apparatuses of chemical and petrochemical technology], Moscow: Khimiya, 1972, 496 p. (In Russ.)
- 12. Strenk F.; Shchuplyak I.A. (Ed.). *Peremeshivaniye i apparaty s meshalkami* [Mixing and apparatuses with stirrers], Leningrad: Khimiya, Leningr. otdeleniye, 1975, 384 p. (In Russ.)
- 13. Gel'ferikh F. *Ionity. Osnovy ionnogo obmena* [Ionites. Fundamentals of ion exchange], Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1962, 490 p. (In Russ.)
- 14. Chernobyl'skiy I.I. (Ed.), Bondar'A.G., Gayevskiy B.A. [et al.]. *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv: Osnovy teorii i rascheta* [Machines and apparatus for chemical production: Fundamentals of theory and calculation], Moscow; Kiyev: Mashgiz [Yuzhnoe otdeleniye], 1959, 464 p. (In Russ.)

### Kinetik der adsorptions-alkalischen Regeneration von verbrauchtem Turbinenöl der Marke TP-22C

**Zusammenfassung:** Es ist der Einfluss von Temperatur, Konzentration und Rührerdrehzahl auf die Kinetik der Regeneration von Altturbinenöl der Marke TP-22S durch die vorgeschlagene alkalische Adsorptionsmethode in einem kapazitiven Apparat mit Rührer betrachtet. Der Durchschnittswert der Aktivierungsenergie im Prozess der Turbinenölregeneration ist geschätzt, wodurch der Temperaturkoeffizient der chemischen Reaktionsrate (Van't Hoff-Koeffizient) berechnet werden konnte. Es ist gezeigt, dass unter den Bedingungen der Durchführung Turbinenölregenerationsprozesses ein Diffusionskontrollbereich beobachtet wird. Es ist ein signifikanter Einfluss der Rotationsfrequenz der Mischeinrichtung auf die Kinetik der Turbinenölregeneration festgestellt, was eine Schlussfolgerung über den externen Diffusionsbereich der Prozesskontrolle zulässt.

### Cinétique de la régénération adsorbante-alcaline d'huile de turbine usagée de marque TP-22C

**Résumé:** Est examinée l'influence de la température, de la concentration, de la vitesse de rotation de l'agitateur sur la cinétique de régénération de l'huile de turbine usagée de la marque TP-22C par la méthode d'adsorption-alcalin proposée dans un appareil capacitif avec un dispositif d'agitation. Est estimée la valeur moyenne de l'énergie d'activation dans le processus de régénération de l'huile de turbine, ce qui a permis de calculer le coefficient de température de la vitesse de réaction chimique (coefficient de van't Hoff Haunt). Est démontré que dans les conditions de la mise en œuvre du processus de régénération de l'huile de turbine, une zone de contrôle de diffusion est observée. Est établi un effet significatif sur la cinétique de régénération de l'huile de turbine de la vitesse de rotation du dispositif d'agitation, ce qui permet de conclure sur la zone de diffusion externe du contrôle du processus.

Авторы: *Черникова Ольга Вячеславовна* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии»; *Рухов Артем Викторович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии»; *Образцова Елена Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Павлинов Роман Юрьевич* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.138-143

# ЗАВИСИМОСТЬ ЛИМИТИРУЮЩЕЙ СТАДИИ РЕАКЦИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ КИСЛЫХ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ НА ЖЕЛЕЗЕ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ДОБАВКИ И ПРИРОДЫ РАСТВОРИТЕЛЯ

Д. В. Балыбин<sup>1</sup>, П. Н. Бернацкий  $^{1}$  В. М. Тютюнник<sup>2</sup>, А. А. Мещерякова  $^{1}$ 

Кафедра химии, pasha-bern@yandex.ru (1); ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия; кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (2); ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** диффузия; железо; кинетика; лимитирующая стадия; разряд; рекомбинация; фенилбигуанидин; электрохимия.

Аннотация: Изучены природа лимитирующей стадии и кинетика реакции выделения водорода на железе в водно-этиленгликолевых растворах НС1 с постоянной ионной силой, равной 1, в присутствии фенилбигуанидина. При введении различных концентраций добавки в исследуемые системы природа лимитирующей стадии не изменяется. Кинетические параметры реакции выделения водорода с введением добавки несколько искажаются, но соответствуют теории замедленного разряда, порядки реакции по частицам добавки имеют отрицательные значения, что характеризует фенилбигуанидин как ингибитор катодного действия.

#### Введение

Исследование влияния природы индивидуального растворителя и растворителя, имеющего смешанный состав, на кинетику и механизм электродных реакций представляет собой глобальную научную задачу, к решению которой исследователи, по существу, только приступают. Роль растворителя как среды и как реагента не может быть однозначно без серьезных допущений выяснена без смены его природы в единых процессах. Это касается закономерностей химических и электрохимических процессов, как гомогенных, так и гетерогенных, протекающих не только в объеме жидкой фазы, но и на границе раздела фаз. Такой подход обусловлен невозможностью однозначной оценки влияния молекул сольвента на поведение системы в целом как с точки зрения состояния твердой фазы (электродов), границы раздела фаз, так и сольватационных эффектов объема раствора [1].

*Цель работы* — изучение кинетики реакции выделения водорода (**PBB**) на железе и диффузии водорода через стальную мембрану из водно-этиленгликолевых растворов HC1 с постоянной ионной силой, равной 1, содержащих фенилбигуанидин ( $\Phi$ **БГ**), молекулярная формула которого имеет вид

#### Методика эксперимента

Исследования проведены в водных и водно-этиленгликолевых (с 50 масс. % воды) растворах с составом электролита xM HCl + (1-x) M LiCl, приготовленных насыщением исходных растворителей сухим хлористым водородом, с последующим разбавлением ими полученной системы до заданной кислотности и введением высушенного при (107 ± 5) °C хлорида лития. Кинетику РВВ исследовали при комнатной температуре на железе АРМКО в условиях потенциолинамической поляризации (скорость развертки 0,66 мВ/с, потенциостат Solartron 1255), водородной атмосферы, при комнатной температуре. Потенциалы были пересчитаны по стандартной водородной шкале. Электрохимические измерения проведены в двух экспериментальных сериях: в одной использован насыщенный водный хлоридсеребряный электрод сравнения, во второй - равновесный водородный электрод в том же рабочем растворе. Первый метод связан с возникновением потенциала жидкостной границы НО-С2Н4-ОН / Н2О, второй – ведет к зависимости потенциала электрода сравнения от кислотности среды, но позволяет непосредственно оценивать величину перенапряжения водорода, определяющую скорость катодного процесса. Потенциалы приведены по стандартной водородной шкале. Рабочий электрод с видимой поверхностью 1 см<sup>2</sup> армировали в оправу из эпоксидной смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, зачищали наждачной бумагой разных номеров и обезжиривали ацетоном. Фенилбигуанидин синтезирован непосредственно для рассматриваемых экспериментов.

#### Экспериментальные результаты

В целях идентификации характера контроля процесса рассматривали влияние скорости вращения дискового электрода на кинетику РВВ в присутствии ФБГ и в фоновых растворах. Соответствующие данные представлены на рис. 1, где видно, что РВВ протекает в условиях исключительно кинетических ограничений.

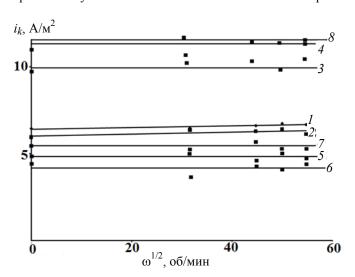


Рис. 1. Влияние частоты вращения дискового электрода Cт3 на катодный ток восстановления ионов водорода в водно-этиленгликолевых растворах:

I, 2-100 масс. %  $H_2O$ ; 3, 4 – содержащих 50 масс. %  $H_2O$ ; 5, 6 – содержащих 10 масс. %  $H_2O$ ; 7, 8 – условно безводный этиленгликоль. Состав электролита 0,1 M HC1+0,9 MLiC1. Состав раствора: I, 3, 5, 7 – фоновые растворы; 2, 4, 6, 8 – фоновые растворы, содержащие 1 мМ  $\Phi$ БГ;  $\Delta E_k = -50$  мВ;  $\tau_{\text{выд}} = 300$  с

Таблица 1 Влияние концентрации фенилбигуанидина на кинетические параметры РВВ в водных растворах НС1

$C_{\Phi \Gamma \mathrm{E}},$ ммоль/л	$-\frac{dE}{d \lg i_k}$ , B	$\frac{dE}{d \lg C_{\text{H}^+}}$ , B	$\left(\frac{\partial \lg i_k}{\partial \lg C_{\operatorname{H}^+}}\right)_{\!E}$	$\frac{d\eta_{\mathrm{H}}}{d \lg i_k}$ , B	$-\frac{d\eta_{\rm H}}{d\lg C_{\rm H^+}},  {\rm B}$	$\left(\frac{\partial \lg i_k}{\partial \lg C_{\operatorname{H}^+}}\right)_{\eta}$
0	0,115	0,068	0,85	0,115	0,060	0,5
0,5	0,115	0,055	0,50	0,115	0	0
1,0	0,125	0,075	0,50	0,125	0	0
5,0	0,125	0,080	0,50	0,125	0,035	0,15
10,0	0,130	0,065	0,75	0,130	0,035	0,25

В чисто водных фоновых растворах закономерности, характеризующие кинетику РВВ, тождественны полученным ранее [2]. Как следует из полученных кинетических параметров (табл. 1), процесс протекает по механизму Фольмера (1) — Тафеля (2) с замедленной стадией разряда:

$$H_3O^+ + e \to H_{a\pi c} + H_2O;$$
 (1)

$$H_{a\pi c} + H_{a\pi c} \rightarrow H_2. \tag{2}$$

Однако при введении 0,5 мМ фенилбигуанидина ситуация меняется кардинально. Наличие уже столь малой концентрации ФБГ приводит к лимитирующей стадии рекомбинации (2) (см. табл. 1). Рост его содержания в 20 раз, в первом приближении, не изменяет наблюдаемой картины (табл. 2). Порядки реакции по фенилбигуанидину при E=-0,4 В и  $\eta=0,2$  В в растворах с x=0,1 моль/л равны соответственно -0,30 и -0,29.

В целом закономерности, наблюдаемые в присутствии  $\Phi F \Gamma$ , существенно отличаются от таковых при введении гуанидина, наличие которого не сказывается на природе замедленной стадии (уравнение (1)) [3].

Таблица 2 Влияние концентрации фенилбигуанидина на кинетические параметры РВВ в растворах, полученных растворением НС1 в водно-этиленгликолевом растворителе, содержащем 50 масс. % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>

$C_{\Phi \Gamma \rm B}, \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$	$-\frac{dE}{d \lg i_k}$ , B	$\frac{dE}{d \lg C_{\text{H}^+}}$ , B	$\left(\frac{\partial l g i_k}{\partial l g C_{H^+}}\right)_{\!E}$	$\frac{d\eta_{\mathrm{H}}}{d \lg i_k}$ , B	$-\frac{d\eta_{\rm H}}{d\lg C_{\rm H^+}},  {\rm B}$	$\left(\frac{\partial \lg i_k}{\partial \lg C_{\operatorname{H}^+}}\right)_{\mathfrak{\eta}}$
0	0,130	0,075	0,85	0,100	0,065	0,55
0,5	0,110	0,090	0,90	0,110	0,035	0,45
1,0	0,125	0,050	0,55	0,125	0,050	0,40
5,0	0,080	0,080	0,80	0,080	0,065	0,40
10,0	0,120	0,080	0,75	0,120	0,050	0,45

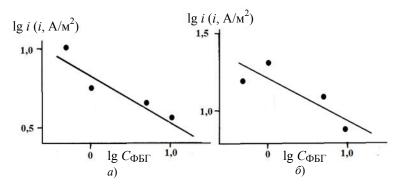


Рис. 2. Влияние концентрации ФБГ на скорость реакции выделения водорода из водных растворов x M HCl + (1-x) M LiCl c x=0,1 моль/л при постоянном потенциале (a), равном 0,35 В, и перенапряжении  $(\delta)$ , равном 0,35 В

С учетом того, что величины дробных зарядов на атомах азота гуанидина и фенилбигуанидина достаточно близки, данный результат можно считать достаточно неожиданным, если принять, что за адсорбцию молекул указанных веществ на железе ответственно донорно-акцепторное взаимодействие азота с железом. Рассмотрим картину, наблюдаемую в смешанном растворителе, содержащем 50 масс. % этиленгликоля. В фоновых растворах, не содержащих ФБГ, картина, остается прежней (см. табл. 2). Изменяется лишь незначительно величина тафелевских наклонов –  $dE/d\lg i_k$  и  $d\eta/d\lg i$ .

Однако, несмотря на то что природа разряжающихся доноров протонов и сольватирующих поверхность железа молекул (H<sub>2</sub>O) остается прежней, влияние ФБГ принципиально изменяется. В средах со смешанным растворителем введение ФБГ и изменение его концентрации более чем на порядок, не оказывают влияния на природу замедленной стадии (реакция (1)). В присутствии гуанидина контролирующей скорость PBB в тех же средах на железе становилась стадия рекомбинации (2) [4]. Таким образом, вновь замена гуанидина на фенилбигуанидин кардинально меняет ситуацию.

Порядок реакции по фенилбигуанидину при E = -0.35 В и  $\eta = 0.35$  В в растворах с x = 0.1 моль/л равен -0.30 (рис. 2).

Таким образом, показано, что влияние ФБГ на кинетику PBB существенно отличается от такового для гуанидина, в частности, наблюдается смена лимитирующей стадии процесса катодного выделения водорода при введении ФБГ уже в малых количествах, а также порядки реакции по ФБГ в указанных растворителях различной природы приобретают близкие значения и характеризуют добавку как ингибитор, поскольку порядки имеют отрицательные значения. Катодный процесс имеет особую роль в электрохимической кинетике, так как на основе, казалось бы, простейшей электрохимической реакции строятся теоретические основы большей части всей электрохимии, поэтому углубление знаний в данном направлении будет несомненно способствовать развитию, как отдельных аспектов электрохимии, так и смежных с ней наук.

#### Заключение

Реакция выделения водорода в рассматриваемых средах протекает в условиях кинетического контроля процесса. При введении ФБГ в фоновые водные растворы происходит смена природы лимитирующей стадии РВВ с замедленного разряда на замедленную рекомбинацию, а затем на лимитирующую латеральную диффузию. При введение фенилбигуанидина в фоновые растворы со смешанным

водно-этиленгликолевым растворителем (50 масс. % воды) во всем изученном концентрационном интервале не происходит смены природы лимитирующей стадии процесса выделения водорода, замедленной остается стадия разряда. В рассматриваемых растворителях порядки реакции по ФБГ имеют отрицательные значения, что характеризует данную добавку как ингибитор катодного действия.

#### Список литературы

- 1. Вигдорович, В. И. Влияние анодной поляризации на диффузию водорода через стальную мембрану в этиленгликолевых растворах / В. И. Вигдорович, Л. Е. Цыганкова, Т. П. Дьячкова // Электрохимия. 2002. Т. 38, № 6. С. 719 724.
- 2. Tsygankova, L. E. Hydrogen diffusion through a Steel membrane in the Water-ethylene Glycol solution containing pyridine in conditions of the cathodic polarization / L. E. Tsygankova, V. I. Vigdorovich, I. V Zarapina // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2009. Vol. 636, No. 1. P. 24 29. doi: 10.1016/j.jelechem.2009.09.005
- 3. Vigdorovich, V. I. Influence of guanidine on kinetics of hydrogen evolution on iron and its diffusion through steel membrane in acidic chloride media / V. I. Vigdorovich, L. E. Tsygankova, D. V. Balybin // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2011. Vol. 653, No. 1. P. 1 6. doi: 10.1016/j.jelechem.2011.01.026
- 4. Влияние гуанидина на выделение и диффузию водорода / В. И. Вигдорович, Л. Е. Цыганкова, Д. В. Балыбин, Д. В. Крыльский, В. А. Яковлева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. -2010. Т. 16, № 1. С. 94-107.

## Dependence of the Limiting Stage of the Reaction of Hydrogen Evolution from Acidic Chloride Solutions on Iron on the Concentration of the Additive and the Nature of the Solvent

D. V. Balybin<sup>1</sup>, P. N. Bernatsky<sup>1</sup>, V. M. Tyutyunnik<sup>2</sup>, A. A. Meshcheryakova<sup>1</sup>

Department of Chemistry, pasha-bern@yandex.ru (1); Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia; Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems (2); TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** diffusion; iron; kinetics; limiting stage; discharge; recombination; phenylbiguanidine; electrochemistry.

**Abstract:** The nature of the rate-limiting stage and the kinetics of the hydrogen evolution reaction on iron in water-ethylene glycol solutions of HC1 with a constant ionic strength of 1 in the presence of phenylbiguanidine were studied. When introducing different concentrations of the additive into the studied systems, the nature of the rate-limiting stage does not change. The kinetic parameters of the hydrogen evolution reaction with the introduction of the additive are somewhat distorted, but correspond to the theory of slow discharge, the reaction orders for additive particles have negative values, which characterizes phenylbiguanidine as an inhibitor of cathodic action.

#### References

1. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.Ye., D'yachkova T.P. [Effect of anodic polarization on hydrogen diffusion through a steel membrane in ethylene glycol solutions], *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 2002, vol. 38, no. 6, pp. 719-724. (In Russ., abstract in Eng.)

- 2. Tsygankova L.E., Vigdorovich V.I., Zarapina I.V. Hydrogen diffusion through a Steel membrane in the Water-ethylene Glycol solution containing pyridine in conditions of the cathodic polarization, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2009, vol. 636, no. 1, pp. 24-29. doi: 10.1016/j.jelechem.2009.09.005
- 3. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Balybin D.V. Influence of guanidine on kinetics of hydrogen evolution on iron and its diffusion through steel membrane in acidic chloride media, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2011, vol. 653, no. 1, pp. 1-6. doi: 10.1016/j.jelechem.2011.01.026
- 4. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.Ye., Balybin D.V., Kryl'skiy D.V., Yakovleva V.A. [The influence of guanidine on the release and diffusion of hydrogen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 1, pp. 94-107. (In Russ., abstract in Eng.)

#### Die Abhängigkeit der limitierenden Grenzstufe der Wasserstoffextraktionsreaktion aus sauren Chloridlösungen auf Eisen von der Konzentration des Zusatzstoffes und der Art des Lösungsmittels

**Zusammenfassung:** Es ist die Art des Begrenzungsstadiums und die Kinetik der Reaktion der Wasserstoffausscheidung auf Eisen in wässrigen Ethylenglykollösungen von HC1 mit einer konstanten Ionenstärke von 1 in Gegenwart von Phenylbiguanidin untersucht. Wenn verschiedene Konzentrationen des Additivs in die untersuchten Systeme eingeführt werden, ändert sich die Natur des Begrenzungsstadiums nicht. Die kinetischen Parameter der Wasserstoffausscheidungsreaktion mit der Einführung des Additivs sind etwas verzerrt, entsprechen jedoch der Theorie der verzögerten Entladung, die Reaktionsordnungen der Additivteilchen haben negative Werte, was Phenylbiguanidin als Inhibitor der kathodischen Wirkung charakterisiert.

## Dépendance du stade limite de la réaction de la libération d'hydrogène des solutions de chlorure acide sur le fer de la concentration de l'additif et de la nature du solvant

**Résumé:** Sont étudiées la nature de l'étape limitante et la cinétique de la réaction de libération d'hydrogène sur le fer dans des solutions aqueuses-éthylène glycol HC1 avec une force ionique constante égale à 1 en présence de phénylbiguanidine. Lors de l'introduction de différentes concentrations d'additifs dans les systèmes étudiés, la nature de l'étape limite ne change pas. Les paramètres cinétiques de la réaction de libération d'hydrogène avec l'introduction de l'additif sont un peu déformés, ne correspondent pas à la théorie de la décharge retardée, les ordres de réaction des particules de l'additif ont des valeurs négatives, ce qui caractérise la phénylbiguanidine en tant qu'inhibiteur de l'action cathodique.

Авторы: Балыбин Дмитрий Викторович — кандидат химических наук, доцент кафедры химии; Бернацкий Павел Николаевич — доктор химических наук, профессор кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия; Тютюнник Вячеслав Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; Мещерякова Алена Александровна — студент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.144-154

#### ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ХАЛКОНОВ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОЛАМИ

С. Е. Синютина<sup>⊠</sup>, С. В. Романцова, А. Г. Шубина, Л. В. Розенблюм

Кафедра биохимии и фармакологии, sinjutina s e@mail.ru; ФБГОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** биологическая активность; квантово-химические расчеты; сайты метаболизма; токсичность; халконы.

Аннотация: Проведен квантово-химический расчет распределения электронной плотности в молекулах 15 халконов, содержащих электронодонорные и электроноакцепторные заместители. Выполнен расчет предположительной биологической активности; определены вероятные пути метаболизма в организме, токсичность исследуемых халконов и продуктов их метаболизма. Высокая вероятность активности халконов как мембранопротекторов и агонистов целостности мембран обусловлена сосредоточением наибольшей электронной плотности на α-атоме углерода. Не обнаружено прямой зависимости между зарядом на α-атоме углерода и вероятностью проявления мембранопротекторной активности, предположительно, из-за стерических затруднений при наличии заместителей одновременно в двух ароматических фрагментах.

#### Введение

Для создания новых лекарственных препаратов проводится активный поиск перспективных органических соединений как природного, так и синтетического происхождения. Растительное сырье является источником различных биологически активных флавоноидов, одной из важных категорий которых являются халконы. Халконы обладают рядом важных преимуществ: они легко синтезируются, могут выступать как промежуточные продукты для синтеза других биологически активных соединений, обладают высокой реакционной способностью благодаря наличию  $\alpha$ -,  $\beta$ -ненасыщенной связи в циннамоильном фрагменте. Халконы и их производные проявляют разнообразные виды биологической активности (антиоксидантную, противовоспалительную, антибактериальную, противогрибковую и др.) и находят применение в медицине [1, 2]. Антиоксидантная активность халконов объясняется их способностью связывать активные формы кислорода [2 – 4]. Предполагается, что высокие антиоксидантные свойства халконов коррелируют с их биологической активностью [5].

Молекулы халконов могут быть очень разнообразными по строению, вероятно, этим и объясняется такой широкий спектр их биологической активности. Тестировать большое количество соединений *in vivo* экономически и практически нецелесообразно. Необходимы расчетные методы, с помощью которых возможен расчет параметров строения молекулы и предварительный отбор тех структур, которые с наибольшей вероятностью будут проявлять тот или иной вид активности. Кроме того, вещество должно не только обладать достаточной эффективностью, но и демонстрировать соответствующие характеристики ADMET (absorption, distribution, metabolism, excretion and toxicity).

В настоящее время существует ряд компьютерных программ, которые позволяют строить математические QSAR- и SAR-модели, отражающие зависимость биологической активности органических соединений от их строения [6]. Аббревиатура QSAR (англ. Quantitative Structure-Activity Relationship) обычно используется для любых моделей, связывающих строение молекулы вещества и его свойства, в том числе и физико-химические. Если рассматривается зависимость именно биологической активности вещества от строения его молекулы, то используют аббревиатуру SAR (англ. Structure-Activity Relationship). Сервисы построения моделей для расчета биологической активности, сайтов метаболизма и токсичности соединений собраны на портале Way2Drug [7]. Для расчета параметров структуры молекул соединения используют квантово-химические методы. С их помощью можно провести оптимизацию геометрии молекулы, определить малликеновские заряды и электронные плотности на атомах, индексы ненасыщенности, дипольные моменты молекул и другие ее параметры [8 – 12].

*Цель работы* — изучение структурных особенностей халконов с электронодонорными и электроноакцепторными заместителями в ароматических фрагментах и определение связи между строением и биологической активностью данных соединений.

#### Материалы и методы

Оптимизацию геометрии молекулы и расчет распределения электронной плотности на атомах, входящих в структуру халконов, проводили с использованием полуэмпирического метода РМЗ. Для анализа биологических эффектов органических веществ и предсказания фармакологических и токсикологических свойств использовали сервисы, представленные на портале Way2Drug. Определение биологической активности осуществляли с помощью сервиса PASS Online, расчет токсичности исследуемых халконов и продуктов их метаболизма проводили с использованием программного обеспечения GUSAR, определение сайтов метаболизма — с помощью веб-сервиса SOMP. Для введения данных о структуре молекул использовали редактор Marvin JS.

### Обсуждение результатов

Рассчитана величина малликеновских зарядов и электронной плотности в молекулах нескольких производных халконов. Структурно данные соединения представляют собой два ароматических шестичленных кольца, между которыми присутствует циннамоильный фрагмент — карбонильная группа и сопряженная с ней двойная связь углерод — углерод.

С ароматической структурой и карбонильной группой могут сопрягаться и электронные структуры заместителей в положениях 2, 4, 6, 2', 4' и 6'. Возникающее в результате действия индуктивных и мезомерных эффектов заместителей перераспределение электронной плотности в молекуле может сказываться на их биологической активности. Рассмотрены халконы (рис. 1, табл. 1), содержащие один или два заместителя (в положениях 4 и 2), либо три заместителя (в положениях 2, 4 и 4').

$$R_1 \xrightarrow{4', 5'} 6', \qquad \beta \qquad \qquad R_2$$

$$R_2 \xrightarrow{3', 2'} R_3$$

Рис. 1. Структурная формула замещенных халконов

# Строение исследованных халконов

Соединение	Заместители
I	$R_1 = COOH, R_2 = H, R_3 = N(CH_3)_2$
II	$R_1 = R_2 = H, R_3 = N(CH_3)_2$
III	$R_1 = NH_2, R_2 = H, R_3 = N(CH_3)_2$
IV	$R_1 = COOH$ , $R_2 = R_3 = OCH_3$
V	$R_1 = H, R_2 = R_3 = OCH_3$
VI	$R_1 = COOH$ , $R_2 = R_3 = OCH_3$
VII	$R_1 = COOH, R_2 = R_3 = OH$
VIII	$R_1 = H, R_2 = R_3 = OH$
IX	$R_1 = NH_2, R_2 = R_3 = OH$
X	$R_1 = COOH, R_2 = R_3 = C1$
XI	$R_1 = H, R_2 = R_3 = C1$
XII	$R_1 = NH_2, R_2 = R_3 = C1$
XIII	$R_1 = R_2 = R_3 = COOH$
XIV	$R_1 = H, R_2 = R_3 = COOH$
XV	$R_1 = NH_2, R_2 = R_3 = COOH$

Таблица 2 Значения вероятности мембранозащитного действия халконов  $P_{\rm a}$ , малликеновских зарядов и электронной плотности на атомах углерода циннамоильной группы

Халкон	биологі активно	тность ической ости <i>P</i> <sub>a</sub> Агонист	Малликеновские заряды qµ, a.e.		Электронная плотность			
	Мембрано- протектор	целостности мембран	$C_{\rm kap f 0}$	$C_{\alpha}$	$C_{\beta}$	$C_{ ext{kap6}}$	$C_{\alpha}$	$C_{\beta}$
I	0,866	0,829	0,299	-0,272	0,002	3,701	4,272	3,998
II	0,895	0,885	0,300	-0,261	-0,012	3,700	4,261	4,012
III	0,845	0,784	0,309	-0,256	-0,019	3,691	4,256	4,019
IV	0,855	0,850	0,295	-0,251	-0,011	3,705	4,251	4,011
V	0,885	0,896	0,298	-0,242	-0,022	3,702	4,242	4,022
VI	0,816	0,793	0,306	-0,236	-0,031	3,694	4,236	4,031
VII	0,885	0,899	0,293	-0,244	-0,017	3,707	4,244	4,017
VIII	0,919	0,932	0,298	-0,237	-0,027	3,702	4,237	4,027
IX	0,855	0,883	0,306	-0,231	-0,036	3,694	4,231	4,036
X	0,827	0,830	0,292	-0,232	-0,037	3,708	4,232	4,037
XI	0,885	0,857	0,297	-0,227	-0,044	3,703	4,227	4,044
XII	0,787	0,755	0,305	-0,214	-0,064	3,695	4,214	4,064
XIII	0,862	0,800	0,287	-0,192	-0,091	3,713	4,192	4,091
XIV	0,863	0,801	0,291	-0,186	-0,100	3,709	4,186	4,100
XV	0,794	0,532	0,298	-0,177	-0,110	3,702	4,177	4,110

Результаты квантово-химических расчетов характеристик молекул халконов и вероятности проявления биологической активности приведены в табл. 2.

Выбраны заместители, обладающие как электронодонорными, так и электроноакцепторными свойствами. Соединение II имеет электронодонорный заместитель - N,N-диметиламиногруппу в положении 4, а в молекуле V в положениях 4 и 2 присутствуют метоксигруппы, также обладающие электронодонорными свойствами, но меньшими по величине, чем у N,N-диметиламиногруппы. Халкон VIII имеет в тех же положениях гидроксигруппы, электронодонорные свойства которых еще несколько ниже. В положениях 4 и 2 соединения XI присутствуют атомы хлора. Они, как и предыдущие группы, обладают отрицательным индуктивным и положительным мезомерным эффектами. Но у атомов галогенов (в отличие от групп -ОН, -ОСН<sub>3</sub>, -N(СН<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) абсолютная величина мезомерного эффекта меньше, чем у индуктивного. Поэтому эти заместители обладают уже электроноакцепторными свойствами, которые еще выше у карбоксильных групп в тех же положениях бензольного кольца у соединения XIV, так как у группы -COOH оба электронных эффекта отрицательные. Следствием перераспределения электронной плотности является изменение малликеновских зарядов и электронной плотности: электронная плотность на атоме карбонильной группы и β-атоме углерода с ростом электроноакцепторных свойств заместителей увеличивается, на α-атоме углерода снижается. У каждого из перечисленных халконов (II, V, VIII, XI, XIV) есть производные, содержащие электронодонорную аминогруппу или электроноакцепторную карбоксильную группу в положении 4'. В каждой тройке соединений при увеличении донорности группы (то есть при переходе от карбоксигруппы к аминогруппе) на атомах углерода карбонильной группы и  $\alpha$ -атоме углерода электронная плотность снижается, а на β-атоме углерода – увеличивается.

Расчет показывает, что наибольшая электронная плотность (и, соответственно, максимальный отрицательный заряд) сосредоточена на  $\alpha$ -атоме углерода. Это позволяет предположить, что именно данный атом углерода способен взаимодействовать со свободно радикальными активными формами кислорода, прежде всего гидроксил-радикалом НО: Такое взаимодействие приведет к нейтрализации активных форм кислорода, и, следовательно, защитит мембраны клеток от окисления и последующего разрушения.

Прогноз мембранопротекторной активности халконов осуществляли с помощью сервиса PASS Online на портале Way2Drug. Проведенные расчеты позволяют предположить, что халконы действительно могут выступать как протекторы мембран и как агонисты целостности мембраны. Значения вероятности проявления такой биологической активности  $P_{\rm a}$  приведены в табл. 2. Вероятность считается достаточно высокой, если  $P_{\rm a} > 0,7$ . Для всех исследуемых соединений  $P_{\rm a}$  соответствует данному критерию.

На рисунках 2 и 3 представлены вероятности проявления биологической активности халконов  $P_{\rm a}$ . Халконы объединены в группы по три соединения, в каждой из которых заместители  $R_2$  и  $R_3$  одинаковы, а заместитель  $R_1$  отличается.

В каждой группе халконов наибольшая вероятность наличия такой биологической активности характерна для соединений, не содержащих заместителей в положении 4'. Введение в положение 4' карбоксильной группы снижает вероятность мембранозащитной активности, введение в то же положение аминогруппы снижает ее в еще большей степени. В литературе [4] представлены данные о прямопропорциональной зависимости антиоксидантных свойств халконов от заряда на  $\alpha$ -атоме углерода. Расчет показывает, что такой же прямой зависимости для вероятности мембранопротекторной активности не наблюдается. Возможно, наличие заместителей одновременно в двух ароматических фрагментах создает пространственные препятствия для взаимодействия активных форм кислорода с  $\alpha$ -атомом углерода.

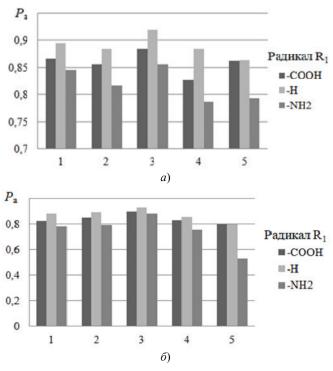


Рис. 2. Вероятность действия халконов как протекторов мембран (a) и агонистов целостности мембран (b):

радикалы 
$$R_2$$
,  $R_3$ :  $1-R_2=H$ ,  $R_3=N(CH_3)_2$ ;  $2-R_2=R_3=OCH_3$ ;  $3-R_2=R_3=OH$ ;  $4-R_2=R_3=CI$ ;  $5-R_2=R_3=COOH$ 

Таким образом, халконы с заместителями в положениях 2 и 4 потенциально можно использовать как вещества, позволяющие сохранить целостность клеточной мембраны. Самую высокую вероятность такого действия имеет халкон с гидроксильными группами в этих положениях. Несколько ниже активность халконов с другими электронодонорными группами (N,N-диметиламиногруппой или метоксигруппами). Еще заметнее снижает активность присутствие электроноакцепторных групп, таких как атомы галогенов и карбоксильная группа.

Использование органических соединений в качестве протекторов мембран возможно только в том случае, если они не обладают токсическим действием. Есть возможность предварительного расчета токсичности органических соединений с учетом их метаболизма с использованием программного обеспечения GUSAR. С помощью этой программы можно определить токсичность веществ для крыс. Программа рассчитывает такой параметр, как ЛД50 (полулетальная доза) и определяет класс опасности вещества. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Величина ЛД50 рассчитывается в ммоль/кг или мг/кг и характеризует среднюю концентрацию вещества, вызывающую гибель половины членов испытуемой группы. Это один из самых распространенных показателей того, насколько опасным является органическое соединение для организма.

Все исследуемые соединения имеют низкий класс опасности. Нет четкой зависимости значений ЛД50 от строения молекул. В большинстве случаев соединения, не содержащие заместителя в положении 4' имеют экстремальные значения по отношению к замещенным соединениям (либо максимальные, либо минимальные).

Таблица 3 Токсичность халконов в зависимости от способа введения

Халкон	ЛД50	Класс опасности			
XaJ	ВБ	BB	ПР	ПК	ВБ/ВВ/ПР/ПК
I	-0,272/157,8	-0,174/198,00	0,945/2605,0	0,577/1114,0	4/4/5/5
II	0,045/311,2	-0,771/47,45	0,784/1704,0	0,422/741,2	4/4/4/4
III	-0,209/155,2	-0,668/53,93	0,966/2324,0	0,745/1398,0	4/4/5/5
IV	0,062/359,9	-0,048/279,70	0,967/2894,0	0,924/2623,0	4/4/5/не токсичен
V	0,479/809,1	-0,403/106,00	1,190/4160,0	1,063/3009,0	5/4/5/ не токсичен
IV	0,308/575,4	-0,500/89,52	0,894/2218,0	0,952/2536,0	5/4/5/ не токсичен
IIV	0,151/402,1	-0,015/274,40	1,087/3473,0	0,828/1911,0	4/4/5/5
IIIV	0,273/439,3	-0,317/122,60	0,906/2049,0	0,778/1525,0	4/4/5/5
IX	0,369/630,4	-0,412/104,2	1,108/3455,0	0,873/2011,0	4/4/5/5
X	0,001/321,9	-0,168/218,20	0,707/1634,0	0,734/1739,0	4/4/4/5
XI	0,004/294,1	-0,775/48,92	0,577/1100,0	0,627/1234,0	4/4/4/5

 П р и м е ч а н и е : ВБ – внутрибрюшинно, ВВ – внутривенно, ПР – перорально, ПК – подкожно.

Следовательно, расчет токсичности – необходимая стадия выбора халкона, который можно будет использовать для создания фармацевтических мембранопротекторных препаратов.

Многие ксенобиотики, попадающие в организм, подвергаются действию ферментов системы микросомального окисления. Образующиеся продукты также не должны быть токсичными для организма. Определены основные сайты метаболизма исследуемых халконов с использованием веб-сервиса SOMP (табл. 4).

Для халконов, содержащих N,N-диметиламиногруппу и метоксигруппу, основным направлением действия ферментов микросомальной системы окисления является реакция деметилирования (отщепления метильной группы от атомов азота и кислорода соответственно). Реакция происходит при участии цитохромов СҮРЗА4, ҮР2D6, СҮР2С19, СҮР2С9, СҮР1А2, являющихся изоформами цитохрома Р450. В получаемых продуктах вместо метоксигруппы будет присутствовать гидроксильная группа, вместо N,N-диметиламиногруппы – N-метиламиноили аминогруппы. Образующиеся группы увеличивают сродство продукта метаболизма к воде, что способствует более быстрому выведению их из организма вместе с мочой. Фермент СҮР2С9 с высокой вероятностью может окислять атом азота в халконах I – III с образованием изонитросоединений – оксимов. Вероятность протекания данной реакции максимальна для соединения III с двумя азотсодержащими группами. Такой же фермент может проявлять высокую активность в окислении атомов азота аминогруппы в соединениях IX, XII и XV. Для двух последних соединений по данным расчета это единственные реакции обезвреживания с помощью ферментов микросомальной системы окисления.

Для соединения IX, содержащего две гидроксильные группы в положениях 2 и 4, возможна также реакция коньюгации с глюкуроновой кислотой при участии фермента УДФ-глюкуронилтрансферазы. Эта же реакция по данным расчета является единственно возможной метаболической реакцией для халконов VII и VIII. Соединения XI, XIII и XIV, в молекулах которых присутствуют только атомы хлора и карбоксильные группы, подвергаются метаболизму с небольшой вероятностью.

Таблица 4 **Вероятность метаболизма халконов различными ферментами** 

Халкон	Тип реакции			Ферм	мент		
		CYP3A4	CYP2D6	CYP2C19	CYP2C9	CYP1A2	УДФ-ГТ
Ι	Деметилиро- вание	0,935	0,936	0,872	0,874	0,878	
	N-окисление				0,704		
II	Деметилиро- вание	0,963	0,971	0,941	0,927	0,946	
	N-окисление				0,819		
III	Деметилиро- вание	0,950	0,958	0,910	0,902	0,930	
	N-окисление				0,889; 0,731		
IV	Деметилиро- вание		0,771	0,774; 0,702	0,729		
V	Деметилиро- вание	0,713	0,880; 0,817	0,827; 0,775	0,806; 0,724	0,747	
VI	Деметилиро- вание		0,808; 0,737	0,760; 0,718	0,893; 0,749		
VII	Конъюгация						0,720
VIII	Конъюгация						0,875; 0,802
IX	N-окисление				0,911		
	Конъюгация						0,732
XII	N-окисление				0,917		
XV	N-окисление				0,899		

Расчет также показал, что токсичность продуктов метаболизма халконов находится примерно на том же уровне, что и токсичность исходных халконов (табл. 5).

#### Заключение

Проведен квантово-химический расчет характеристик пятнадцати молекул халконов с электронодонорными и электроноакцепторными заместителями. Установлено, что введение заместителей в положения 2, 4 и 4' влияет на распределение электронной плотности на атомах углерода циннамоильного фрагмента. С увеличением электронодонорных свойств заместителей наблюдается снижение электронной плотности на атомах углерода карбонильной группы и  $\alpha$ -атоме углерода и увеличение этого параметра на  $\beta$ -атоме углерода. По данным расчета радикалы активных форм кислорода будут выбирать для атаки  $\alpha$ -атом углерода, так как на нем сосредоточена наибольшая электронная плотность. Полученные результаты не противоречат известным литературным данным.

Активность α-атома углерода циннамоильного фрагмента при взаимодействии с активными формами кислорода позволяет халконам проявлять свойства антиоксидантов и защищать от разрушения мембраны клеток. Высокую вероятность активности халконов как мембранопротекторов и агонистов целостности мембран подтверждает и расчет биологической активности с помощью сервиса PASS

Varrorr	П.,		Класс опасности			
Халкон	Продукт метаболизма	ВБ	BB	ПР	ПК	
I	1деметилирование: $-N(CH_3)_2$ → $-NHCH_3$	4		5		
	2окисление: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -N(CH_3)(OH)$	4		4		
	3деметилирование: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH_2$	5				
	4 окисление: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH(OH)$	4		5	5	
II	1деметилирование: $-N(CH_3)_2$ → $-NHCH_3$	7 4		3	3	
	2деметилирование: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH_2$	5				
	3 окисление: $-N(CH_3)_2$ → $-N(CH_3)(OH)$	4		4		
	4 окисление: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH(OH)$	4				
III	1деметилирование: $-N(CH_3)_2$ → $-NHCH_3$			5	Не ток- сичен	
	2 окисление: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -N(CH_3)(OH)$	5		4		
	3деметилирование: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH_2$			_	5	
	4 окисление: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH(OH)$			5		
	5 окисление: –NH <sub>2</sub> → –NH(OH)			4		
•	6 окисление: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH(OH)$ окисление: $-NH_2 \rightarrow -NH(OH)$	4				
	7 деметилирование: $-N(CH_3)_2 \rightarrow -NH_2$ окисление: $-NH_2 \rightarrow -NH(OH)$	5	4			
IV	1 деметилирование: $-OCH_3 \rightarrow -OH$				Не ток-	
	2 деметилирование: 2 –OCH <sub>3</sub> → 2 –OH	<b>-</b>			5	
V	1 деметилирование: –ОСН <sub>3</sub> → –ОН	4			Не ток	
					сичен	
	2 деметилирование: 2 –ОСН <sub>3</sub> → 2 –ОН			_	5	
VI	1 деметилирование: $-OCH_3 \rightarrow -OH$	5		5	Не ток сичен	
	2 деметилирование: $-OCH_3 \rightarrow -OH$	4				
	окисление: $-NH_2 \rightarrow -NH(OH)$	4				
	3 деметилирование: 2 –OCH <sub>3</sub> → 2 –OH				5	
	4 деметилирование: 2 –OCH <sub>3</sub> → 2 –OH				3	
	окисление: $-NH_2$ → $-NH(OH)$	5				
IX	окисление: $-NH_2 \rightarrow -NH(OH)$					
XII	окисление: $-NH_2 \rightarrow -NH(OH)$			4	Не ток сичен	
XV	окисление: $-NH_2 \rightarrow -NH(OH)$	4		5	5	

Online  $(P_a > 0.7)$ . Самую высокую вероятность такого действия имеет халкон с гидроксильными группами в положениях 2 и 4.

Определены основные сайты метаболизма исследуемых халконов и рассчитана токсичность как исходных халконов, так и всех вероятных продуктов их метаболизма. Эти соединения можно отнести к малоопасным. Можно рекомендовать исследуемые халконы для разработки мембранопротекторных препаратов.

- 1. Pharmacological Properties of Chalcones: A Review of Preclinical Including Molecular Mechanisms and Clinical Evidence / B. Salehi, C. Quispe, I. Chamkhi [et al.] // Frontiers in Pharmacology. 2021. Vol. 18, No. 11. Art. 592654. doi: 10.3389/fphar.2020.592654
- 2. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина / Ю. С. Тараховский, Ю. А. Ким, Б. С. Абдрасилов [и др.]. Пущино: Synchrobook, 2013. 307 с.
- 3. Gaikwad, P. Radiation and quantum chemical studies of chalcone derivatives / P. Gaikwad, K. I. Priyadarsini, S. Naumov, B. S. Rao // Journal of Physical Chemistry A. 2010. Vol. 5, No. 114(30). P. 7877 7885. doi: 10.1021/jp103382x
- 4. Оганесян, Э. Т. Использование квантово-химических параметров для прогнозирования антирадикальной (но) активности родственных структур, содержащих циннамоильный фрагмент. І. Производные коричной кислоты, халкона и флаванона / Э. Т. Оганесян, С. С. Шатохин, А. А. Глушко // Фармация и фармакология. 2019. № 7(1). С. 53 66. doi:10.19163/2307-9266-2019-7-1-53-66
- 5. Characterization, molecular modeling and pharmacology of some 2-hydroxy-chalcone derivatives as SARS-CoV-2 inhibitor / M. Nasir Uddin, S. Samina Ahmed, M. Uzzaman [et al.] // Results in Chemistry. 2022. Vol. 4. P. 100329. doi: 10.1016/j.rechem.2022.100329
- 6. A Guide to in Silico Drug Design / Y. Chang, B. A. Hawkins, J. J. Du, P. W. Groundwater, D. E. Hibbs, F. Lai // Pharmaceutics. 2023 Vol. 15, No. 49. doi: 10.3390/pharmaceutics15010049
- 7. Поройков, В. В. Компьютерное конструирование лекарств: от поиска новых фармакологических веществ до системной фармакологии / В. В. Поройков // Биомедицинская химия. -2020.-T.66, № 1.-C.30-41.
- 8. Revealing the role of fluorine pharmacophore in chalcone scaffold for shifting the MAO-B selectivity: investigation of a detailed molecular dynamics and quantum chemical study / F. A. Olotu, M. Joy, M. A. Abdelgawad [et al.] // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2021. Vol. 39(16). P. 6126 6139. doi: 10.1080/07391102.2020.1796803
- 9. Spectroscopic, chemical reactivity, molecular docking investigation and QSAR analyses of (2E)-1-(3-bromo-2-thienyl)-3-(2,5-dimethoxyphenyl)prop-2-en-1-one / P. Ramesh, M. L. Caroline, S. Muthu [et al.] // Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2019. Vol. 5, No. 222. P. 117190. doi: 10.1016/j.saa.2019.117190
- 10. Design, syntheses, theoretical calculations, MM-GBSA, potential anti-cancer and enzyme activities of novel Schiff base compounds / H. Yalazan, D. Koç, F. AydınKose [et al.] // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2023. Vol.  $3.-P.\ 1-14.\ doi:\ 10.1080/07391102.2023.2274972$
- 11. Nandi, S. QSAR of Chalcones Utilizing Theoretical Molecular Descriptors / S. Nandi, M. C. Bagchi // Current Computer Aided Drug Design. 2015. Vol. 11, No. 2. P. 184 193. doi: 10.2174/1573409911666150702101559
- 12. Characterization, molecular modeling and pharmacology of some Ź-hydroxychalcone derivatives as SARS-CoV-2 inhibitor / U. M. Nasir, A. S. Samina, M. Uzzaman [et al.] // Results in Chemistry. 2022. Vol. 4. Art. 100329. doi: 10.1016/j.rechem.2022.100329

# A Study of the Structure and Biological Activity of Chalcones Using Computational Methods

S. E Sinyutina<sup>™</sup>, S. V. Romantsova, A. G. Shubina, L. V. Rosenblum

Department of Biochemistry and Pharmacology, sinjutina\_s\_e@mail.ru; Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

**Keywords:** biological activity; quantum chemical calculations; metabolic sites; toxicity; chalcones.

**Abstract:** A quantum chemical calculation of the electron density distribution in molecules of 15 chalcones containing electron-donating and electron-accepting substituents was carried out. The estimated biological activity was calculated; the probable pathways of metabolism in the body, the toxicity of the studied chalcones and their metabolic products were determined. The high probability of chalconeactivity as membrane protectors and membrane integrity agonists is due to the highest electron density concentration on the  $\alpha$ -carbon atom. No direct relationship was found between the charge on the  $\alpha$ -carbon atom and the likelihood of membrane-protective activity, presumably due to steric hindrance in the presence of substituents in two aromatic fragments simultaneously.

### References

- 1. Salehi B., Quispe C., Chamkhi I., El Omari N., Balahbib A., Sharifi-Rad J., Bouyahya A., Akram M., Iqbal M., Docea A.O., Caruntu C., Leyva-Gómez G., Dey A., Martorell M., Calina D., López V., Les F. Pharmacological Properties of Chalcones: A Review of Preclinical Including Molecular Mechanisms and Clinical Evidence, *Frontiers in Pharmacology*, 2021, vol. 18, no. 11, art. 592654. doi: 10.3389/fphar. 2020.592654
- 2. Taraxovskij Yu.S., Kim Yu.A., Abdrasilov B.S. [et al.], *Flavonoidy: bioximiya, biofizika, medicina* [Flavonoids: biochemistry, biophysics, medicine], Pushhino: Synchrobook, 2013, 307 p. (In Russ.)
- 3. Gaikwad P., Priyadarsini K.I., Naumov S., Rao B.S. Radiation and quantum chemical studies of chalcone derivatives, *Journal of Physical Chemistry A*, 2010, vol. 5, no. 114(30), pp. 7877-7885, doi: 10.1021/jp103382x
- 4. Oganesyan E.T., Shatoxin S.S., Glushko A.A. [Use of quantum chemical parameters to predict the antiradical (but) activity of related structures containing a cinnamoyl moiety. I. Derivatives of cinnamic acid, chalcone and flavanone], *Farmatsiya i farmakologiya* [Pharmacy and pharmacology], 2019, no. 7(1), pp. 53-66, doi:10.19163/2307-9266-2019-7-1-53-66 (In Russ., abstract in Eng.)
- 5. Uddin M. Nasir, Samina S. Ahmed, Uzzaman M. [et al.], Characterization, molecular modeling and pharmacology of some 2-hydroxychalcone derivatives as SARS-CoV-2 inhibitor, *Results in Chemistry*, 2022, vol. 4, pp. 100329, doi: 10.1016/j.rechem.2022.100329
- 6. Chang Y., Hawkins B.A., Du J.J., Groundwater P.W., Hibbs D.E., Lai F. A Guide to In Silico Drug Design, *Pharmaceutics*, 2023, vol. 15, no. 49, doi: 10.3390/pharmaceutics15010049
- 7. Porojkov V.V. [Computer-aided drug design: from the search for new pharmacological substances to systemic pharmacology], *Biomeditsinskaya khimiya* [Biomedical chemistry], 2020, vol. 66, no. 1, pp. 30-41. (In Russ., abstract in Eng.)
- 8. Olotu F.A., Joy M., Abdelgawad M.A., Narayanan S.E., Soliman M.E., Mathew B. Revealing the role of fluorine pharmacophore in chalcone scaffold for shifting the MAO-B selectivity: investigation of a detailed molecular dynamics and quantum chemical study, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2021, vol. 39, no. 16, pp. 6126-6139, doi: 10.1080/07391102.2020.1796803
- 9. Ramesh P., Caroline M.L., Muthu S., Narayana B., Raja M., Ben Geoffrey A.S. Spectroscopic, chemical reactivity, molecular docking investigation and QSAR analyses

- of (2E)-1-(3-bromo-2-thienyl)-3-(2,5-dimethoxyphenyl)prop-2-en-1-one, *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, vol. 5, no. 222, pp. 117190. doi: 10.1016/j.saa.2019.117190
- 10. Yalazan H., Koç D., Aydın Kose F., Fandaklı S., Tüzün B., Akgül M.İ., Sadeghian N., Taslimi P., Kantekin H. Design, syntheses, theoretical calculations, MM-GBSA, potential anti-cancer and enzyme activities of novel Schiff base compounds, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2023, vol. 3, pp. 1-14. doi: 10.1080/07391102.2023.2274972
- 11. Nandi S., Bagchi M.C. QSAR of Chalcones Utilizing Theoretical Molecular Descriptors, *Current Computer Aided Drug Design*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 184-193, doi: 10.2174/1573409911666150702101559
- 12. Nasir U.M., Samina A.S., Uzzaman M. [et al.], Characterization, molecular modeling and pharmacology of some 2-hydroxychalcone derivatives as SARS-CoV-2 inhibitor, *Results in Chemistry*, 2022, vol. 4, art. 100329. doi: 10.1016/j.rechem. 2022.100329

# Untersuchung der Struktur und der biologischen Aktivität der Chalkone mit Hilfe von Berechnungsmethoden

Zusammenfassung: Es ist eine quantenchemische Berechnung der Elektronendichteverteilung in Molekülen von 15 Chalkonen durchgeführt, die elektronendonorhaltige Substituenten und Elektronenakzeptor-Stellvertreter enthalten. Die Berechnung der vermuteten biologischen Aktivität ist durchgeführt; die wahrscheinlichen Stoffwechselwege im Körper, die Toxizität der untersuchten Chalkons und die Produkte ihres Stoffwechsels sind bestimmt. Die hohe Wahrscheinlichkeit, dass Chalkone als Membranschutzmittel und Agonisten der Membranintegrität wirken, ist auf die Konzentration der höchsten Elektronendichte am Kohlenstoffatom zurückzuführen. Es ist keine direkte Korrelation zwischen der Ladung am Kohlenstoffatom und der Wahrscheinlichkeit einer membranschützenden Wirkung festgestellt, was vermutlich auf sterische Schwierigkeiten bei gleichzeitiger Anwesenheit von Substituenten in zwei aromatischen Fragmenten zurückzuführen ist.

# Étude de la structure et de l'activité biologique des chalcons par les méthodes de calcil

**Résumé:** Est effectué un calcul chimique quantique de la distribution de la densité électronique dans les molécules de 15 chaltons contenant des donneurs d'électrons et des substituants électroniques accepteurs. Est réalisé le calcul de l'activité biologique supposée; sont déterminés les voies probables du métabolisme dans le corps, la toxicité des chaltons étudiés et les produits de leur métabolisme. La forte probabilité d'activité des chalcons en tant que membranoprotecteurs et agonistes de l'intégrité de la membrane est due à la concentration de la plus grande densité électronique sur  $\alpha$ un atome de carbone. Il n'y a pas de relation directe entre la charge sur l'atome de carbone et la probabilité de manifestation d'une activité membranoprotectrice, probablement en raison de difficultés stériques avec la présence de substitutions dans deux fragments aromatiques simultanément.

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

## Материаловедение. Нанотехнологии

УДК 620.22-022.532

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.155-163

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВИРОВАННОГО ВЫСОКОПОРИСТОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДЕКСТРИНА И ОКСИДА ГРАФЕНА

И. Н. Шубин $^{1} \boxtimes$ , А. А. Попова $^{2}$ 

Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов», i.shubin77@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), Тамбов, Россия; департамент по корпоративным коммуникациям, AO «ПРОГРЕСС» (2), Липецк, Россия

**Ключевые слова:** высокопористый углеродный материал; гранулометрический состав; диагностика; структура материала; химическая активация.

Аннотация: Химическая активация углеродного материала является широко используемым процессом повышения его физико-химических характеристик, прежде всего, оказывает влияние на увеличение удельной поверхности и объема пор, являющихся ключевыми параметрами для различных материалов, например, для сорбентов. Однако фактическое отсутствие информации по влиянию отдельных этапов технологического процесса на углеродный материал заставляет проводить большой объем экспериментальных исследований по определению оптимальных значений режимных параметров активации. В рамках работы представлены результаты экспериментальных исследований по определению ряда параметров активированного углеродного материала, таких как гранулометрический состав и структура, применительно к удельной поверхности и пористости, после различных вариантов активации.

#### Ввеление

В современной промышленности широко используются различные дисперсные материалы, в том числе нанодисперсные, имеющие самые разнообразные физико-механические и физико-химические характеристики, учет которых необходим при разработке и использовании как различного технологического оборудования, так и при проведении технологических процессов. Причем, чаще всего, проводятся работы по определению исходных или конечных характеристик дисперсных материалов и не рассматриваются характеристики, обусловленные отдельными этапами обработки — будь то физическое или химическое воздействия, физические или структурные параметры материалов (которым характерны радикальные изменения). На этом принципе, в частности, основаны такие широко применяемые в химии, энергетике и ряде других отраслей процессы, как функционализация и активация [1-3]. В реальном же производстве изменения параметров обрабатываемых материалов напрямую сказываются на производительности, продолжительности процесса, энергозатратах и ряде других показателей.

При этом непосредственно учету характеристик дисперсных материалов при обработке посвящено небольшое количество публикаций. Авторы работ [4-7], в которых исследуются физико-механические характеристики различных дисперсных материалов применительно к технологическому оборудованию, отмечают, что на данный момент исследования процесса взаимодействия между дисперсным материалом и применяемым оборудованием во многих случаях характеризуются накоплением знаний, необходимых для понимания основных закономерностей, отсутствием однозначности в понимании протекающих процессов, а также единой терминологии. Это приводит к тому, что результаты экспериментальных исследований различных авторов часто затруднительно сравнивать, а так как любой из исследуемых процессов еще имеет и свои особенности, то в итоге это затрудняет или делает невозможным практическое применение результатов исследований [5,8].

Рассматривая процесс активации углеродного материала, можно выделить такие его этапы, как предварительную карбонизацию различного углеродного сырья и затем последующую химическую активацию [9 – 14]. При этом активируемый карбонизат и активированные углеродные материалы представляют собой типовой тонко и нанодисперсный сыпучий материал, проявляющий соответствующие ему свойства [15, 16].

При этом для углеродного материала многими авторами рассматриваются лишь отдельные его характеристики, в основном применительно к лабораторным исследованиям, и не учитываются изменения параметров материалов, зависящих от особенностей прилагаемых воздействий, а также условий реального использования. Так, например, во многих работах рассматриваются влияние электростатических свойств на процесс переработки, общие физико-механические характеристики отдельных частиц, законы их движения, гигроскопичность и плотность, что говорит об отсутствии попытки комплексного анализа свойств или хотя бы групп отдельных параметров углеродных материалов, способных оказывать влияние на конечные характеристики [7-11, 15, 16].

Важность информации о свойствах и структуре позволяет решить большой объем задач, которые появляются при проектировании аппаратурно-технологического оформления любого технологического процесса и тем более настолько сложного, как высокотемпературная химическая активация. Так, например, информация о структуре активированного углеродного материала может позволить оптимизировать режимные параметры процесса, такие как температура, продолжительность, применение различных активаторов, вид и объем рабочих сред и т.д. А знание базовых свойств материалов (физико-механических характеристик) позволит рационально спроектировать технологическое оборудование, учитывающее особенности именно конкретного материала или дисперсной смеси (насыпную плотность, углы откоса и обрушения, текучесть, адгезию, гигроскопичность, сводообразование и др.)

*Цель работы* – комплексное определение физико-химических и структурных характеристик активированного углеродного материала при различных режимах активации.

#### Объекты и методы исследования

Литературные источники и экспериментальные исследования, проведенные авторами ранее, позволили установить, что высокотемпературная химическая активация может быть проведена на основе нескольких вариантов, причем в ходе проведения лабораторных исследований установлены наиболее рациональные технологические режимы, обеспечивающие получение активированного углерод-

ного материала с необходимыми свойствами [18, 19]. Согласно *первому* варианту активации, процесс протекал в два этапа, при ступенчатом нагреве смеси из карбонизированного углеродного сырья и щелочи в инертной среде (исходный карбонизат — композиция декстрин и оксид графена + гидроксид калия) до 400 и 750 °C и выдержке в один час и два или три соответственно. *Второй* вариант реализации данного процесса отличался температурой на втором этапе — 600 °C и подачей водяного пара (второго активатора) в объем реактора. Причем было установлено, что продолжительность процесса может быть уменьшена на более чем 30 % — до двух часов — для варианта активации с одним активатором, а температура протекания процесса активации с 750 до 600 °C — для варианта активации с двумя активаторами.

Эффективность проведения процесса активации оценивалась по характеристикам полученного углеродного материала (удельной поверхности и пористости), определяемым на аналитическом комплексе Nova Quantachrome Е 1200. Для определения удельной поверхности использовался многоточечный метод ВЕТ, а для пористости – метод DFT, так как данные модели анализа наилучшим образом отвечают параметрам исследуемых материалов. Результаты диагностики полученного материала представлены в табл. 1.

В рамках проведения дополнительных исследований структурных характеристик активированного углеродного материала проведен анализ его структуры с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ARL Equinox 1000—на первом этапе, а также анализ гранулометрического состава (размер частиц и их объем) методом динамического рассеяния света с помощью анализатора частиц Nicomp 380 ZLS—на втором, причем на обоих этапах исследования проводились в сравнении с параметрами исходного карбонизата.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов по вариантам реализации процесса активации позволил уточнить оптимальные технологические режимы процесса (температуру, продолжительность процесса и др.) для получения высокопористого углеродного материала [18, 19]. Однако наибольший практический интерес, в рамках данной работы, представляют результаты серии дополнительных исследований материалов активированных по различным вариантам активации применительно к уже полученым результатам. Так, на первом этапе дополнительных исследований (исследование структуры углеродного материала) получены рентгенограммы, представленные на рис. 1.

Таблица 1 **Характеристики углеродного материала** при различных вариантах активации

Режим активации	$S_{ m BET}$ , ${ m M}^2/\Gamma$	$V_{\Sigma  m DFT}$ , cm <sup>3</sup> /Γ	$V_{ m Mикропор},{ m cm}^{3/}$ г
В течение 3 ч	25002600	1,21,3	0,91,0
В течение 2 ч	27002800	1,21,3	1,11,2
С дополнительной обработкой паром	26002700	1,31,4	0,80,9

 $\Pi$  р и м е ч а н и е : приведены усредненные диапазоны значений серий экспериментов.

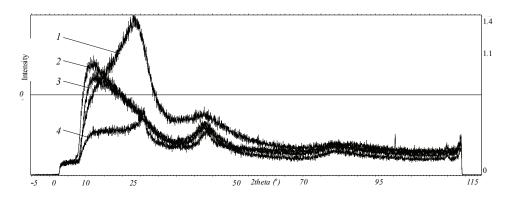


Рис. 1. Результаты рентгеноструктурного анализа образцов: I — исходный карбонизат; 2, 3 и 4 — активация соответственно в течение 3 ч, 2 ч и с дополнительным воздействием паром

Полученные рентгенограммы отражают асимметричность рефлексов в дифракционной картине анализируемых образцов, они могут быть разделены на составляющие, которые позволят охарактеризовать структуру углерода с различной степенью упорядоченности. На рентгенограмме (см. рис. 1, *a*), которая соответствует исходному карбонизату, отмечены два пика, расположенные под углами 20...25° и 40...45°. Это характерные (при данных углах) пики, соответствующие типовой картине углерода, находящегося в аморфном состоянии, что полностью соответствует неупорядоченной аморфной структуре исходного карбонизата.

Асимметричный пик (см. рис. 1,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ) показывает наличие дефектов, то есть неупорядочной структуры углерода, и указывает на графитовую природу исследуемых материалов, что коррелируется с проведенной активацией образцов, после которой аморфный углерод превращается в графит в процессе активации.

Изменение вида рентгенограммы (см. рис. 1,  $\epsilon$ , по сравнению с рис. 1,  $a-\epsilon$ ) связано со значительной интенсификацией протекания процесса активации под действием синергетического эффекта от применения двух активаторов. Это приводит к повышению асимметрии пиков, ширина которых указывает на нанокристаллическую или неоднородную аморфную структуру, что подтверждается более развитой пористостью образцов.

Анализируя результаты второго дополнительного этапа исследований, на котором определен фракционный состав, как активированного по двум вариантам углеродного материала, так и исходного карбонизата, можно также сделать ряд выводов по изменению его параметров (табл. 2).

Исходный размер карбонизата получается принудительно за счет размола, и, таким образом, его параметры — размер частиц и, соответственно, их объем можно принять за точку отчета, относительно которой фиксируются изменения характеристик гранулометрического состава углеродного материала в процессе проведения активации различной продолжительности и с использованием разных активаторов.

Из полученных результатов видно, что увеличение неоднородности материала связано с увеличением воздействующих факторов и в процессе активации углеродный материал демонстрирует склонность к образованию агломератов при наличии ярко выраженной нанодисперсной фракции. Это может указывать на прогрессирующую неоднородность материала под действием режимных параметров активации, вследствие разрушения его структуры, и потенциальное снижение его эксплуатационных характеристик.

	Ко	оличество част	иц	Объем частиц			
Фракция	Средний размер, нм	Отклонение, нм (%)	Содержа- ние, %	Средний размер, нм	Отклонение, нм (%)	Содержание, %	
Исходный карбонизат							
Фракция 1	155,7	26,5 (17,0)	84,9	170,4	32,1 (18,8)	18,4	
Фракция 2	430,7	81,0 (18,8)	15,1	483,8	92,3 (19,1)	81,6	
		Активированны	ый углеродны	й материал (	(2 4)		
Фракция 1	191,2	30,4 (15.9)	90,4	210,2	32.6 (15,5)	30,9	
Фракция 2	541,8	92,5 (17,1	9,6	617,7	99.8 (16,2)	69,1	
		Активированны	ый углеродны	й материал (	(3 4)		
Фракция 1	50,3	6,6 (13,2)	99,3	54,3	9,2 (16,9)	5,7	
Фракция 2	277,7	48,2 (17,4)	0,7	322,9	93,6 (16,6)	94,3	
Активированный углеродный материал (с дополнительной обработкой паром)							
Фракция 1	229,2	55,7 (24,3)	83,2	266,7	52.2 (19,6)	4,0	
Фракция 2	1112,9	174,2 (15,7)	17,7	1214,7	212.7 (17,5)	96,0	

Примечание: приведены усредненные значения серий экспериментов.

#### Заключение

Несмотря на то что результаты проведенных исследований в целом неоднозначны и отчасти противоречивы, сопоставляя их с результатами ранее проведенных авторами исследований по определению удельной поверхности и пористости, представляется возможным интерпретировать полученные результаты в ходе дополнительно проведенных исследований:

- а) по результатам структурного анализа установлено:
- структура активированного углеродного материала при продолжительности процесса активации 2 и 3 часа в целом аналогична, что подтверждает возможность сокращения продолжительности процесса химической активации;
- форма рефлексов может говорить о наличии изменений в материале при активации с образованием развитой наноразмерной структуры (в микро- и мезодиапазонах);
- интенсификация протекания процесса активации за счет дополнительного воздействия пара приводит к изменению структуры углеродного материала с увеличением удельной поверхности и пористости в микро- и мезодиапазонах, причем при более низких температурах;
- б) в качестве вывода по гранулометрическому анализу можно заключить, что увеличение факторов воздействия приводит к усилению неоднородности, а также образованию агломератов вследствие разрушения структуры активируемого углеродного материала.

Результаты проведенных исследований позволят снизить неопределенность и неоднозначность при определении факторов, влияющих на определение наиболее рациональных режимных параметров реализации высокотемпературной активации по получению высокопористого углеродного материала (на основе декстрина и оксида графена) с большой удельной поверхностью и значительным объемом пор, приходящихся на нанометровый диапазон.

- 1. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев М.: ИД Спектр, 2013. 152 с.
- 2. Popova, A. A. Apparatus and Technological Design of the Production Process of Activated Highly Porous Carbon Material / A. A. Popova, I. N. Shubin // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1942. P. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1942/1/012025
- 3. Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологического производства / В. Ф. Олонцев, Е. А. Фарберова, А. А. Минькова [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2015. № 4. С. 9 23.
- 4. Основы технологии подготовки дисперсных материалов при переработке энергетических конденсированных систем: в 2 ч. Ч. 1. Изучение свойств и подготовка дисперсных материалов / Н. А. Симбирцев [и др.]. М. : Архитектура-С, 2006. 191 с.
- 5. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. М. : Машиностроение, 1973.-216 с.
- 6. Попова, А. А. Анализ влияния свойств нанодисперсных систем на конструкции технологического оборудования / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. -2020. -№ 7(724). C. 3 12. doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12
- 7. Попова, А. А Особенности поведения движущегося слоя нанодисперсного материала и их учет при проектировании технологического оборудования / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. -2020. Т. 26, № 2. С. 323 335. doi: 10.17277/ vestnik.2020.02.pp.323-335
- 8. Андрианов, Е. И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов / А. И. Андрианов. М. : Химия, 1982. 256 с.
- 9. Popova, A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // Advanced Materials & Technologies. 2020. No. 3(19). P. 28 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
- 10. Zgrzebnicki, M. Sorption and Textural Properties of Activated Carbon Derived from Charred Beech Wood / M. Zgrzebnicki, A. Kałamaga, R. Wrobel // Molecules. 2021. Vol. 26, No. 24. P. 7604. doi: 10.3390/molecules26247604
- 11. Prauchner, M. J. Chemical versus physical activation of coconut shell: A comparative study / M. J. Prauchner, F. Rodriguez-Reinoso // Microporous and Mesoporous Materials. 2012. No. 152. P. 163 171. doi: 10.1016/j.micromeso.2011.11.040
- 12. Preparation of activated carbon from cherry stones by physical activation in air. Influence of the chemical carbonisation with  $H_2SO_4$  / M. Olivares-Marín, C. Fernández-González, A. Macías-García, V. Gómez-Serrano // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2012. No. 94. P. 131 137. doi: 10.1016/j.jaap.2011.11.019
- 13. Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust by Carbon Dioxide Activation / M. A. F. Mazlan, Y. Uemura, S. Yusup, F. Elhassan, A. Uddin, A. Hiwada, M. Demiya // Procedia Engineering. 2016. No.148. P. 530 537. doi: 10.1016/j.proeng. 2016.06.549
- 14. Effect of pyrolysis conditions on the improvement of the physicochemical structure of activated carbon obtained from Jixi bituminous coal / D. D. Liu, B. Y. Jia, S. Li, L. J. Dong, J. H. Gao, Y. K. Qin // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2019. Vol. 14, No. 15. doi: 10.1002/apj.2289
- 15. Определение углов и коэффициентов трения углеродных наноматериалов / В. Ф. Першин, Т. Х. К. Алсайяд, Т. В. Пасько, А. А. Пасько // Ползуновский вестник. -2018. № 4. С. 184 188.

- 16. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
- 17. К вопросу промышленного использования углеродных наноматериалов / С. В. Першина, В. Ф. Першин, А. Г. Ткачев, А. И. Шершукова // Приборы. -2007. № 10(88). С. 57-60.
- 18. Попова, А. А. Исследование технологических параметров активации, влияющих на характеристики нанопористого углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Материаловедение. -2022. -№ 11. C. 3-8. doi: 10.31044/1684-579X-2022-0-11-3-8
- 19. Попова, А. А. Исследование процесса высокотемпературной щелочной активации углеродного материала с дополнительным воздействием водяным паром / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. − 2022. − Т. 28, № 3. − С. 476 − 486. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486

## A Study of Physical and Structural Characteristics of Activate High-Porous Carbon Material Based on Dextrin and Graphene Oxide

I. N. Shubin<sup>1</sup>, A. A. Popova<sup>2</sup>

Department of Equipment and Technology of Manufacturing Nanoproducts, TSTU, i.shubin77@yandex.ru (1); Tambov, Russia; Department of Corporate Communications, JSC PROGRESS (2), Lipetsk, Russia

**Keywords:** chemical activation; highly porous carbon material; diagnostics; granulometric composition; material structure.

**Abstract:** Chemical activation of a carbon material is a widely used process for improving its physicochemical characteristics, primarily an increase in the specific surface area and pore volume, which are key parameters for various materials, such as sorbents. However, the actual lack of information on the effect of individual stages of the technological process on the carbon material makes it necessary to carry out a large amount of experimental research to determine the optimal values of the operating parameters of activation. The study presents the results of experimental studies to determine a number of parameters of the activated carbon material, such as particle size distribution and structure in relation to the specific surface area and porosity after various activation options. The authors made an attempt, after analyzing the obtained values, to find patterns and dependencies that will reduce the uncertainty and increase the efficiency of the implementation of the process of high-temperature chemical activation as a whole.

#### References

- 1. Dyachkova, T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerod-nykh nanotrubok* [Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes], Moscow: Spektr, 2013, 152 p. (In Russ.)
- 2. Popova A.A., Shubin I.N. Apparatus and Technological Design of the Production Processof Activated Highly Porous Carbon Material, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1942, pp. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1942/1/012025
- 3. Olontsev V.F. [Optimization of the porous structure of activated carbons in the process of technological production], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnichesko-go universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i*

- *biotekhnologiya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2015, no. 4, pp. 9-23. (In Russ., abstract in Eng.)
- 4. Simbirtsev N.A. [et al.] Osnovy tekhnologii podgotovki dispersnykh materialov pri pererabotke energeticheskikh kondensirovannykh sistem: v 2 ch. part 1. Izucheniye svoystv i podgotovka dispersnykh materialov [Fundamentals of technology for the preparation of dispersed materials in the processing of energy condensed systems: in 2 hours, part 1. Study of the properties and preparation of dispersed materials], Moscow: Arkhitektura-S, 2006, 191 p. (In Russ.)
- 5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.)
- 6. Popova A.A., Shubin I. N. [Analysis of the influence of the properties of nanodispersed systems on the design of technological equipment], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Engineering], 2020, no. 7(724), pp. 3-12. doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12 (In Russ., abstract in Eng.)
- 7. Popova A.A., Shubin I. N. [Features of the behavior of a moving layer of nanodispersed material and their consideration in the design of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 323-335. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.323-335 (In Russ., abstract in Eng.)
- 8. Andrianov E.I. *Metody opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov* [Methods for determining the structural and mechanical characteristics of powdered materials], Moscow: Himiya, 1982, 256 p. (In Russ.)
- 9. Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis, *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 3(19), pp. 28-32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
- 10. Zgrzebnicki M., Kałamaga A., Wrobel R. Sorption and Textural Properties of Activated Carbon Derived from Charred Beech Wood, *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 24, pp. 7604. doi: 10.3390/molecules26247604
- 11. Prauchner M.J., Rodriguez-Reinoso F.Chemical versus physical activation of coconut shell: A comparative study, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, no. 152, pp. 163-171. doi: 10.1016/j.micromeso.2011.11.040
- 12. Olivares-Marín M., Fernández-González C., Macías-García A., Gómez-Serrano V. Preparation of activated carbon from cherry stones by physical activation in air. Influence of the chemical carbonisation with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, no. 94, pp. 131-137. doi: 10.1016/j.jaap.2011.11.019
- 13. Mazlan M.A.F., Uemura Y., Yusup S., Elhassan F., Uddin A., Hiwada A., Demiya M. Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust by Carbon Dioxide Activation, *Procedia Engineering*, 2016, no. 148, pp. 530-537. doi: 10.1016/j.proeng. 2016.06.549
- 14. Liu D.D., Jia B.Y., Li S., Dong L.J., Gao J.H., Qin Y.K. Effect of pyrolysis conditions on the improvement of the physicochemical structure of activated carbon obtained from Jixi bituminous coal, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2019, vol. 14, no. 15. doi: 10.1002/apj.2289
- 15. Pershin V.F., Alsayyad T.Kh.K., Pas'ko T.V., Pas'ko A.A. [Determination of angles and coefficients of friction of carbon nanomaterials], *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Vestnik], 2018, no. 4, pp. 184-188. (In Russ., abstract in Eng.)
- 16. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystvo, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, property, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
- 17. Pershina S.V., Pershin V.F., Tkachev A.G., Shershukova A.I. [On the issue of industrial use of carbon nanomaterials], *Pribory* [Appliances], 2007, no. 10(88), pp. 57-60. (In Russ., abstract in Eng.)

- 18. Popova A.A., Shubin I.N. [Investigation of technological activation parameters affecting the characteristics of nanoporous carbon material], *Materialovedenie* [Materials Science], 2022, no. 11, pp. 3-8. doi: 10.31044/1684-579X-2022-0-11-3-8 (In Russ., abstract in Eng.)
- 19. Popova A.A., Shubin I.N. [Study of the process of high-temperature alkaline activation of carbon material with additional exposure to water vapor], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 476-486 doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486. (In Russ., abstract in Eng.)

# Untersuchung der physikochemischen und strukturellen Eigenschaften von aktiviertem hochporösem Kohlenstoffmaterial auf Basis von Dextrin und Graphenoxid

**Zusammenfassung:** Die chemische Aktivierung des Kohlenstoffmaterials ist ein weit verbreiteter Prozess zur Verbesserung seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften, der vor allem die Erhöhung der spezifischen Oberfläche und des Porenvolumens beeinflusst, die Schlüsselparameter für verschiedene Materialien sind, z. B. für Sorptionsmittel. Der tatsächliche Mangel an Informationen über die Auswirkungen einzelner Prozessschritte auf das Kohlenstoffmaterial führt jedoch zu einer großen Anzahl von experimentellen Studien zur Bestimmung der optimalen Aktivierungsparameter. Im Rahmen der Arbeit sind die Ergebnisse experimenteller Studien Bestimmung einer Reihe von Parametern des aktivierten Kohlenstoffmaterials, wie der granulometrischen Zusammensetzung und der Struktur, Bezug auf spezifische Oberfläche und Porosität, nach verschiedenen Aktivierungsoptionen vorgestellt.

# Études des caractéristiques physico-chimiques et structurelles du matériau haut poreux activé à base de carbone dextrine et oxyde de graphène

**Résumé:** L'activation chimique d'un matériau carboné est un procédé couramment utilisé pour augmenter ses caractéristiques physico-chimiques, principalement en influençant l'augmentation de la surface spécifique et du volume des pores, qui sont des paramètres clés pour différents matériaux, par exemple pour les sorbants. Cependant, l'absence réelle d'informations sur l'influence de certaines étapes du processus sur le matériau carboné conduit à de nombreuses études expérimentales visant à déterminer les valeurs optimales des paramètres d'activation du régime. Sont présentés les résultats des études expérimentales sur la détermination d'un certain nombre de paramètres du matériau carboné activé, tels que la composition granulométrique et la structure, en ce qui concerne la densité et la porosité, après différentes options d'activation.

**Авторы:** *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Попова Алёна Алексеевна* – кандидат технических наук, специалист по корпоративной социальной ответственности департамента по корпоративным коммуникациям, АО «ПРОГРЕСС», Липецк, Россия.

DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.164-173

# ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ SIKA VISCOCRETE-225 Р НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСНО-ГИПСОВОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С ПОЗИЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРЫ

## Т. И. Горохов, Н. С. Ковалев⊠, А. В. Ерофеев

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», kov.nik.01@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** древесно-гипсовый композитный материал; исследования; пластификатор; пористость; порометрия; прочностные показатели.

**Аннотация:** Разработан древесно-гипсовый композитный материал, имеющий невысокие прочностные характеристики, которые возможно повысить с помощью использования модифицирующих добавок. Исследовано влияние добавки Sika ViscoCrete-225 P на изменение прочностных характеристик. Отмечено, что добавка позволяет уменьшить неоднородную пористость композитного материала и, как следствие, повысить его прочностные показатели.

#### Введение

Древесно-гипсовый композитный материал, основными компонентами которого являются древесные опилки и гипс, обладает недостаточными показателями прочности, определяющими область его использования. Для того чтобы повысить показатели данной характеристики, и, как следствие, увеличить охват возможных применений одного композитного материала в разных условиях эксплуатации, используют различные добавки. Одной из таких добавок является Sika ViscoCrete-225 P.

За исходный образец взят древесно-гипсовый композитный материал оптимального состава [1]. Прочностные характеристики данного композитного материала получены экспериментальным путем и составили:

- прочность на растяжение при изгибе составляет 0,55 МПа;
- прочность на сжатие –1,46 МПа.

Полученные значения недостаточны для широкого спектра применения композитного материала. Для решения данной проблемы рекомендуется использовать модифицирующие добавки.

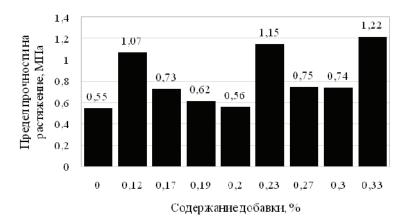
## Исследование повышения механических характеристик древесно-гипсового материала с добавкой Sika ViscoCrete-225 P

Для повышения механических характеристик древесно-гипсового материала в качестве добавки использован пластификатор Sika ViscoCrete-225 Р в виде порошка на основе эфиров поликарбоксилатов, предназначенный для производства сухих строительных смесей и бетонов на основе вяжущих с высоким содержанием сульфата кальция или чистых гипсовых связующих [2]. Добавка применяется для повышения механических характеристик готовых изделий (как ранней, так и конечной прочности), в том числе и на основе гипсового вяжущего. Применение

добавки позволяет увеличить подвижность смеси, снизить усадку и ползучесть. Ввод Sika ViscoCrete-225 Р осуществляется в сухое гипсовое вяжущее с тщательным перемешиванием смеси перед добавлением древесных опилок и воды. Введение добавки практически не влияет на процесс гидратации. Sika ViscoCrete-225 Р имеет высокую степень адсорбации.

Использование добавки Sika ViscoCrete-225 Р для повышения прочностных характеристик образцов древесно-гипсового композитного материала на основе гипсового вяжущего и древесных опилок происходило в определенном проценте от массы гипса, применяемого для изготовления образцов требуемых размеров, для дальнейшего испытания на прочность. Масса данной добавки определялась от массы гипса в определенных процентах: 0,12; 0,17; 0,19; 0,20; 0,23; 0,27; 0,30 и 0,33; показатели прочности – с помощью испытательного пресса ИП-500 АВТО (ЗИПО) [3]. Данные, полученные в ходе проведения испытаний для определения значения прочности на растяжение при изгибе и прочности на сжатие, систематизировались (рис. 1).

Анализируя влияние процентного содержания добавки Sika ViscoCrete-225 Р в древесно-гипсовом композитном материале на прочность на растяжении при изгибе (см. рис. 1, a), сделан вывод, что рассматриваемая добавка приводит к ее увеличению. Однако стоит отметить, что из-за сложности действия добавки



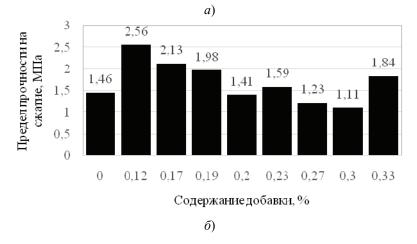


Рис. 1. Влияние процентного содержания добавки Sika ViscoCrete-225 Р в древесно-гипсовом композитном материале на прочность: на растяжении при изгибе (a), при сжатии (б)

выявить закономерности такого влияния не представляется возможным. Наибольшее значение предела прочности на растяжение при изгибе равно 1,22 МПа при добавлении 0,33 % добавки Sika ViscoCrete-225 P, что в 2,2 раза больше, чем у древесно-гипсового композита с оптимальным составом (0,55 МПа).

При анализе влияния процентного содержания добавки Sika ViscoCrete-225 Р в древесно-гипсовом композитном материале на прочность при сжатии (см. рис. 1, б), видно, что уже при добавлении 0,12 % добавки Sika ViscoCrete-225 Р происходит повышение прочности более чем в 1,5 раза, по сравнению с показателем прочности у древесно-гипсового композита с оптимальным составом (1,46 МПа). Дальнейшее увеличение процентного содержания добавки приводит к постепенному снижению прочности на сжатие образцов древесно-гипсового композитного материала. Из общей картины выбивается процентное содержание добавки в 0,33 %, при которой получена прочность на сжатие 1,84 МПа.

Одной из основных причин повышения прочности гипсового вяжущего при добавлении Sika ViscoCrete-225 Р является улучшение адгезии между частицами гипса. Модифицирующий компонент способствует образованию более прочных межчастичных связей, что приводит к формированию более плотной и однородной структуры материала. Это в свою очередь уменьшает количество микротрещин и пор, повышая прочностные характеристики материала. Повышение пластичности гипса обуславливает образование более плотной структуры. Однако при повышении концентрации добавки более 0,12 % в процессе кристаллизации гипсового вяжущего образуется значительный избыток влаги, который снижает прочность изделий из древесно-гипсового композита.

Чтобы уменьшить избыток влаги и, как следствие, повысить прочность, необходимо изменить соотношение компонентов композита. Для оценки возможности повышения прочностных характеристик древесно-гипсового композитного материала с использованием добавки Sika ViscoCrete-225 Р путем снижения избытка влаги изготовлены образцы с измененным процентным содержанием исходных компонентов (табл. 1). Для данных образцов также с помощью испытательного пресса ИП-500 АВТО определены показатели прочности на сжатие и растяжение при изгибе. Данные, полученные в ходе проведения испытаний для определения значения прочности на сжатие, систематизировались и отображены на рис. 2.

Анализируя влияние процентного содержания добавки Sika ViscoCrete-225 Р в древесно-гипсовом композитном материале с скорректированным составом на прочность на сжатие, сделан вывод, что рассматриваемая добавка приводит к увеличению прочности на сжатие относительно образцов без добавления модифицирующей добавки. Однако значения прочности на сжатие все же ниже, чем для образцов оптимального состава с добавлением модификатора, что открывает широкое поле для проведения исследований по поиску оптимального соотношения исходных компонентов и модифицирующей добавки с позиции уменьшения

Таблица 1 Составы древесно-гипсового композитного материала

Номер состава	Вода, %	Гипс марки Г16, %	Древесные опилки, %	Добавка Sika ViscoCrete-225 P, % от массы гипса
1	33	51		0,17
2	32	52	16	0,20
3	31	53	16	0,23
4	30	54		0,27

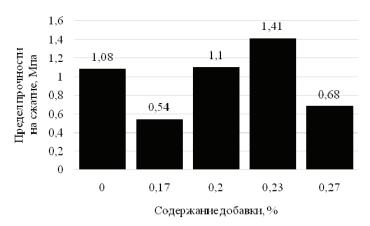


Рис. 2. Влияние процентного содержания добавки Sika ViscoCrete-225 Р в древесно-гипсовом композитном материале с измененным отношением воды к гипсу на прочность при сжатие

количества избыточной влаги. Наибольшее значение предела прочности на сжатие (1,41 МПа) получается при добавлении 0,23 % добавки Sika ViscoCrete-225 Р (состав № 3, табл. 1), что в 1,3 раза больше, чем у древесно-гипсового композита с оптимальным составом (1,08 МПа).

Из вышесказанного следует, что оптимальным процентом добавки Sika ViscoCrete-225 Р для изготовления древесно-гипсового композитного материала с повышенными прочностными характеристиками, при изменении отношения компонентов воды и гипса, является 0,23 %.

# Изучение зависимости механических характеристик древесно-гипсового материала с добавкой Sika ViscoCrete-225 P от пористости его структуры

Для детального изучения влияния добавки на прочность композита необходимо учесть, что прочностные характеристики древесно-гипсового композитного материала напрямую зависят от его структуры, в том числе пористости. Для определения пористости структуры использовался метод ртутной порометрии, проводимый на приборе порозиметр ртутный Quantachrome PoreMaster 33 [4]. Метод ртутной порометрии заключается в нагнетании под растущим давлением внутрь пор композитного материала ртути, которая не смачивает материал, тем самым не меняет его изначальные характеристики пористой структуры [5]. Для проведения опыта взяты два образца: nepвый — древесно-гипсовый композит без добавки; smopoй — древесно-гипсовый композит без добавки; smopoй — древесно-гипсовый композит с добавкой Sika ViscoCrete-225 Р (состав № 3, см. табл. 1).

Для того чтобы провести точные испытания и получить достоверную информацию для дальнейшего анализа, созданы одинаковые условия для образцов:

- масса образцов 0,60 г;
- объем образцов 1,00 см<sup>3</sup>;
- температура измерений 20 °C;
- напряжение поверхности ртути 480,00 эрг/см<sup>2</sup>;
- угол контакта ртути 140,00°.

Напряжение поверхности ртути и угол контакта ртути на широком спектре твердых тел являются константами.

После завершения работы порозиметра прибор выдает отчет для каждого из образцов, включающий в себя два графика зависимости объема пор от их размеров: интегральный и дифференциальный. Графики интегральной зависимости

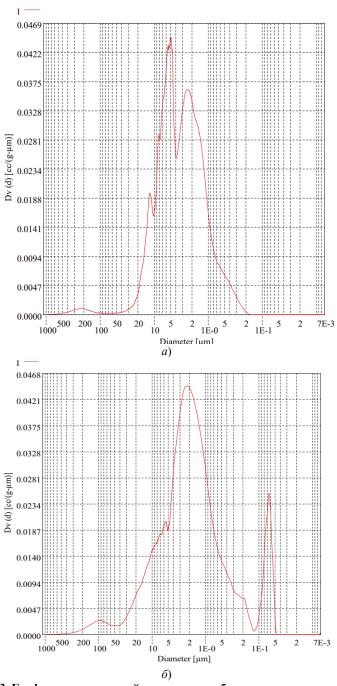


Рис. 3. Графики интегральной зависимости объема пор от их размеров для образцов № 1 (древесно-гипсовый композит без добавки) (a) и № 2 (древесно-гипсовый композит с добавкой Sika ViscoCrete-225 P) ( $\delta$ )

объема пор от их размеров для образца № 1 (древесно-гипсовый композит без добавки) и образца № 2 (древесно-гипсовый композит с добавкой Sika ViscoCrete-225 P) представлены на рис. 3.

Графики дифференциальной зависимости объема пор от их размеров для образца № 1 (древесно-гипсовый композит без добавки) и образца № 2 (древесно-

гипсовый композит с добавкой Sika ViscoCrete-225 P) представлены на рис. 4, а их числовая интерпретация в табл. 2. На основании полученных данных по анализу диаметра пор можно выделить следующее:

– образец № 2 имеет меньший средний диаметр пор (7,381 мкм) по сравнению с образцом № 1 (8,045 мкм), что указывает на более мелкопористую структуру древесно-гипсового композитного материала при добавлении в него добавки;

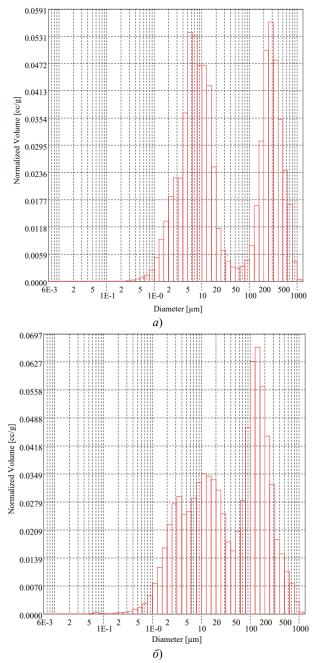


Рис. 4. Графики дифференциальной зависимости объема пор от их размеров для образцов № 1 (древесно-гипсовый композит без добавки) (a) и № 2 (древесно-гипсовый композит с добавкой Sika ViscoCrete-225 P) (б)

# Параметры пористой структуры

Диаметр пор, мкм	Образец № 1	Образец № 2
Минимальный	0,0071	0,0071
Максимальный	1077,8	1073,3
Средний	8,045	7,381
Модальный	4,89	2,28
Медианный	14,58	4,38

- модальный диаметр, характеризующий диаметр большинства пор, у образца № 2 (2,28 мкм) значительно меньше, чем у образца № 1 (4,89 мкм), что подтверждает преобладание более мелких пор в образце № 2;
- медианный диаметр, соответствующий диаметру, при котором масса всех частиц делится на две равные части (масса частиц, диаметр которых меньше медианного диаметра, равна 50 % массы всех частиц образца) у образца № 1 (14,58 мкм) намного выше, чем у образца № 1, что указывает на преобладание пор большего размера.

Анализ удельный площади поверхности показал, что образец № 2 имеет большую удельную площадь поверхности (0,3612 м²/г для образца № 1 и 0,4570 м²/г для образца № 2), что свидетельствует о развитой микропористой структуре, при этом образец № 1 имеет более плотную структуру с меньшим количеством микропор.

Это подтверждает и анализ объемной пористости – для образца № 1 данный показатель равен 38,62 %, а для образца № 2 – 55,07 %; межчастичная пористость (характеризующая объем пустот) образца № 1 равна 33,22 %, образца № 2 – 46,22 %; внутричастичная пористость, характеризующая сквозные или замкнутые поры, образца № 1 равна 5,39 %, № 2 – 8,85 %. Данные получены на основании объема введенной ртути: для образца № 1 – 0,7264 см³/г и № 2 – 0,8433 см²/г.

Кроме того, анализ структуры материала методом ртутной порометрии позволил получить данные распределения пор по размерам для каждого образца:

- № 1 0,0071...1077,8 MKM,
- № 2 0,0071...1073,3 MKM.

При этом основной диапазон размеров пор образца № 1 равен 7...15 мкм, а № 2-2...5 мкм.

Таким образом, образец № 2 имеет преимущественно мелкопористую структуру с основным диапазоном пор 2...5 мкм, что подходит для адсорбционных и фильтрующих применений, а образец №1 имеет более крупные поры (7...15 мкм), тем самым делая его более пористым, что гораздо лучше подходит для изделий, где требуется более высокая теплоизоляция и меньший вес.

Несмотря на то что у большинства строительных материалов увеличение пористости структуры ведет к непосредственному уменьшению прочностных характеристик, в образцах древесно-гипсового композитного материала с содержанием добавки Sika ViscoCrete-225 Р можно заметить прирост прочностных показателей, по сравнению с контрольным образцом без добавки. Это можно объяснить тем, что уменьшение размеров пор и их замкнутость, и, как следствие, уменьшение дефектов структуры материла, позволяют увеличить сопротивляемость образцов к внешним воздействиям. Также одним из важных параметров, способных существенно влиять на прочностные показатели образцов, является форма пор. Так как при добавлении рассмотренного модификатора улучшается адгезия между частицами гипса, а также образуются более прочные межчастичные связи, что приводит к формированию более плотной и однородной структуры материала, поры приобретают округлую форму, которая стремится к сферической. Данная форма пор позволяет максимально равномерно распределить внешнюю нагрузку на образец, что позволяет выдержать большее напряжение без разрушения.

Проанализировав полученные данные после проведения ртутной порометрии, сделан вывод, что образец №2 (древесно-гипсовый композит с добавкой Sika ViscoCrete-225 P) имеет более мелкопористую структуру.

#### Заключение

Таким образом, на основании полученных данных выделены следующие особенности применения модифицирующей добавки при изготовлении древесногипсового композитного материала:

- оптимальным процентом добавки Sika ViscoCrete-225 Р для изготовления древесно-гипсового композитного материала с повышенными прочностными характеристиками без изменения процентного соотношения исходных компонентов является 0,12 %. В данном случае показатель прочности на растяжение при изгибе увеличивается почти в 2,2 раза (с 0,55 МПа до 1,07 МПа), а значение прочности на сжатие увеличивается более чем в 1,5 раза (с 1,46 МПа до 2,56 МПа).
- введение в состав древесно-гипсового композитного материала модифицирующей добавки Sika ViscoCrete-225 Р приводит к изменению процессов структурообразования, что позволяет получить мелкопористую структуру с равномерным распределением пор по объему материала. Это в свою очередь позволяет распределить действующие внутренние напряжения более равномерно, в связи с чем наблюдается повышение прочностных характеристик материала.
- изменение соотношения исходных компонентов древесно-гипсового композитного материала при использовании модифицирующей добавки Sika ViscoCrete-225 P сопровождается сложными процессами структурообразования и требует более широкого изучения.

В работе применялось оборудование ЦКП НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

### Список литературы

- 1. Пат. 2788603 Российская Федерация, МПК С04В 28/14. Древесногипсовый композит / Ерофеев А. В., Горохов Т. И., Ковалев Н. С., Горохов С. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»; № 2022108904 ; заявл. 04.04.2022; опубл. 23.01.2023. Бюл. № 3. -4 с.
- 2. Техническое описание продукта Sika® ViscoCrete®-225 P. Текст электронный. URL : https://rus.sika.com/dms/getdocument.get/7532af7c-03ae-4d9c-a68b-9de2584cf559/sika-viscocrete-225p.pdf (дата обращения: 18.02.2025).
- 3. Прессы испытательные гидравлические ИП-500 // РСЦИМ. Испытательные машины. Текст электронный. URL: https://rscim.ru/uploads/pdf/ispitatelnie-pressi/ip-500.pdf?ysclid=m5htlm36cw767286199 (дата обращения: 18.12.2024).
- 4. Quantachrome poremaster 33 порозиметр ртутный // ГК «Новые технологии». Текст электронный. URL : https://atnprn.nt-rt.ru/price/product/538598?ysclid=m5htz08c1t109960521 (дата обращения: 18.12.2024).

5. Определение размера пор методом ртутной порозиметрии // Институт фармакопеи и стандартизации в сфере обращения лекарственных средств. – Текст электронный. – URL: https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/1/1-1/1-2/opredelenie-razmera-por-metodom-rtutnoy-porozimetrii/ (дата обращения: 18.12.2024).

# The Effect of Sika ViscoCrete-225 P Additive on Strength Characteristics of Wood-Gypsum Composite Material from the Position of Changing its Structure

T. I. Gorokhov, N. S. Kovalev<sup>⊠</sup>, A. V. Erofeev

Department of Design of Buildings and Structures, kov.nik.01@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** wood-gypsum composite material; research; plasticizer; porosity; porosimetry; strength properties.

**Abstract:** A wood-gypsum composite material has been developed that has low strength characteristics, which can be increased by using modifying additives. The effect of the Sika ViscoCrete-225 P additive on the change in strength characteristics was studied. It was noted that the additive allows to reduce the non-uniform porosity of the composite material and, as a result, to increase its strength characteristics.

#### References

- 1. Yerofeyev A.V., Gorokhov T.I., Kovalev N.S., Gorokhov S.I. *Drevesno-gipsovyy kompozit* [Wood-gypsum composite], Russian Federation, 2023, Pat. 2788603. (In Russ.)
- 2. available at: https://rus.sika.com/dms/getdocument.get/7532af7c-03ae-4d9c-a68b-9de2584cf559/sika-viscocrete-225p.pdf (accessed 18 February 2025).
- 3. available at: https://rscim.ru/uploads/pdf/ispitatelnie-pressi/ip-500.pdf?ysclid=m5htlm36cw767286199 (accessed 18 December 2024).
- 4. available at: https://atnprn.nt-rt.ru/price/product/538598?ysclid=m5htz08c1t109960521 (accessed 18 December 2024).
- 5. available at: https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/1/1-1/1-1-2/opredelenie-razmera-por-metodom-rtutnoy-porozimetrii/ (accessed 18 December 2024).

# Auswirkung des Zusatzmittels Sika ViscoCrete-225 P auf die Festigkeitseigenschaften des Holz-Gips-Verbundwerkstoffes in Bezug auf die Veränderungen in seiner Struktur

**Zusammenfassung:** Es ist ein Holz-Gips-Verbundwerkstoff entwickelt, der geringe Festigkeitseigenschaften aufweist, die durch den Einsatz von modifizierenden Additiven verbessert werden können. Die Wirkung des Additivs Sika ViscoCrete-225 P auf die Änderung der Festigkeitseigenschaften ist untersucht. Es ist darauf hingewiesen, dass das Additiv es ermöglicht, die ungleichmäßige Porosität des Verbundmaterials zu verringern und dadurch seine Festigkeitseigenschaften zu verbessern.

# Effet de l'additif Sika ViscoCrete-225 P sur les caractéristiques de résistance du matériau composite bois-gypse du point de vue de la modification de sa structure

**Résumé:** Est mis au point un matériau composite bois-gypse qui présente des caractéristiques de faible résistance qui peuvent être améliorées par l'utilisation d'additifs modificateurs. Est étudié l'effet de l'additif Sika ViscoCrete-225 P sur la modification des caractéristiques de résistance. Il est à noter que l'additif permet de réduire la porosité inhomogène du matériau composite et, par conséquent, d'augmenter ses performances de résistance.

**Авторы:** *Горохов Тимофей Иванович* — аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Ковалев Никита Святославович* — магистрант; *Ерофеев Алексанор Владимирович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

# Для заметок