ISSN 0136-5835 (Print)
ISSN 2542-1409 (Online)
DOI: 10.17277/vestnik

ВЕСТНИК Тамбовского государственного технического университета

TRANSACTIONS of the Tambov State Technical University

2026. Том 32. № 3.

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 научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Тамбов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Столин Александр Моисеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН, 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 30.09.2026. Дата выхода в свет 20.10.2026.
Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,75; уч.-изд. л. 18,00. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 029.
Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835 (Print)
ISSN 2542-1409 (Online)
Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026
© Коллектив авторов, 2026

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 356

Каменская М. А., Карелин П. И., Чернышова Т. И. Определение метрологической исправности и метрологической надежности информационно-измерительных систем при их проектировании и эксплуатации 356

Алексеев В. В., Емельянов Е. В., Иванов Д. А., Рыжов И. Г. Алгоритм формирования управляющих воздействий на множестве альтернатив при управлении системой специального назначения 363

Свешников А. Ю., Никитников Ю. В., Шильцын М. А., Дедов Д. Л. Применение больших языковых моделей для организации профессиональной подготовки на базе иммерсивных систем 373

Шаповалов В. Д., Кучер В. П., Безкоровайный В. С. Цифровая обработка выходных сигналов феррозондов 390

Наурусова Г. А., Балашов В. М., Семенова Е. Г., Смирнова М. С. Применимость нейросетевых компонент искусственного интеллекта в контуре принятия решений информационно-измерительных систем дистанционного зондирования геопространства 398

Архипов А. Е., Божий А. А., Круглов В. С. Программный модуль адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью для стимуляции двигательной активности пользователя 408

Маслов А. А., Тихомиров С. Г., Карманова О. В., Хаустов И. А., Титова Е. Е. Сравнительный анализ моделей кинетики изотермической вулканизации резиновой смеси с использованием физически-информированной нейронной сети 424

Бритвина В. В., Конюхова Г. П., Боброва Е. О., Иванов М. А., Гусев А. О., Мекшенева Ж. В., Дубровина О. В. Комплексный анализ применимости методов обнаружения DDoS-атак в SDN-инфраструктуре финансовых организаций с учетом актуальной российской регуляторной базы и открытых данных 436

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия 452

Сажин А. В., Гуданов И. С., Долгин Д. С., Ватагин А. А., Лебедев А. Е. Исследование и совершенствование моделей межфазного сопротивления для численного моделирования псевдоожиженного слоя 452

Ткаченко А. С., Панов С. Ю., Химвинга М., Шипилова Е. А. Определение оптимального расположения сопла в устройстве пневмоимпульсной регенерации рукавных фильтров 462

Филинков Л. И., Таршис М. Ю., Королев Л. В., Капранова А. Б. Исследование барабанно-лопастного смесителя сыпучих материалов и выбор его параметров 472

Горшенина В. А., Абоносимов О. А., Лазарев С. И., Баронин Г. С., Брянкин К. В., Зарапина И. В., Соколов М. В., Бернацкий П. Н. Экспериментальные исследования и расчет электросорбционной активности полимерных мембран ОПМН-К и АМН-П в водных растворах хлорида и ацетата кальция 479

Хорохорина И. В., Филимонова О. С., Лазарев С. И., Дьячкова Т. П., Брянкин К. В., Баронин Г. С., Бернацкий П. Н. Аморфно-кристаллические изменения в ионообменной смоле после электродеионизационной очистки хромсодержащих растворов 491

Барсуков Г. В., Фроленков К. Ю., Фетисов А. С., Власов В. В., Петрухин А. В. Моделирование режимов нанесения полимерного компаунд-протектора на абразив в кипящем слое для подводного гидроабразивного резания 505

Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю. Блок химической регенерации воздуха 516

Машиностроение. Металлообработка 525

Тихомиров В. А., Ермолов А. В., Капранова А. Б. Параметрическая модель узла мелющего аппарата погружного типа 525

CONTENTS

Automation. Information Technology. Control. Instruments 356

Kamenskaya M. A., Karelin P. I., Chernyshova T. I. Determination of Metrological Serviceability and Metrological Reliability of Information-Measurement Systems during Design and Operation 356

Alekseev V. V., Emelyanov E. V., Ivanov D. A, Ryzhov I. G. Algorithm for Generating Control Actions from a Set of Alternatives in the Management of a Special-Purpose System 363

Sveshnikov A. Yu., Nikitnikov Yu. V., Shiltsyn M. A., Dedov D. L. Application of Large Language Models for Organizing Professional Training Based on Immersive Systems 373

Shapovalov V. D., Kucher V. P., Bezkorovayny V. S. Digital Processing of Fluxgate Sensor Output Signals 390

Naurusova G. A., Balashov V. M., Semenova E. G., Smirnova M. S. Applicability of Neural Network AI Components within the Decision-Making Loop of Geospatial Remote Sensing Information-Measurement Systems 398

Arkhipov A. E., Bozhiy A. A., Kruglov V. S. Software Module for Adapting a Virtual Environment with Biofeedback to Stimulate User Motor Activity 408

Maslov A. A., Tikhomirov S. G., Karmanova O. V., Khaustov I. A., Titova E. E. Comparative Analysis of Kinetic Models of Isothermal Vulcanization of Rubber Compounds Using a Physically Informed Neural Network 424

Britvina V. V., Konyukhova G. P., Bobrova E. O., Ivanov M. A., Gusev A. O., Meksheneva Zh. V., Dubrovina O. V. Comprehensive Analysis of the Applicability of DDoS Attack Detection Methods in the SDN Infrastructure of Financial Organizations with Account of the Current Russian Regulatory Framework and Open Data 436

Chemical Engineering and Related Industries. Chemistry 452

Sazhin A. V., Gudanov I. S., Dolgin D. S., Vatagin A. A., Lebedev A. E. Research and Improvement of Interfacial Resistance Models for Numerical Simulation of Fluidized Bed 452

Tkachenko A. S., Panov S. Yu., Himwinga M., Shipilova E. A. Determining the Optimal Nozzle Position Pulse-Jet Cleaning Systems for Bag Filters 462

Filinkov L. I., Tarshis M. Yu., Korolev L. V., Kapranova A. B. Investigation of a Drum-and-Blade Mixer for Bulk Materials and Selection of Its Parameters 472

Gorshenina V. A., Abonosimov O. A., Lazarev S. I., Baronin G. S., Bryankin K. V., Zarapina I. V., Sokolov M. V., Bernatsky P. N. Experimental Investigation and Calculation of the Electro-Sorption Activity of OPMN-K and AMN-P Polymer Membranes in Aqueous Solutions of Calcium Chloride and Calcium Acetate 479

Khorokhorina I. V., Filimonova O. S., Lazarev S. I., Dyachkova T. P., Bryankin K. V., Baronin G. S., Bernatsky P. N. Amorphous-Crystalline Changes in Ion-Exchange Resin after Electrodeionization Purification of Chromium-Containing Solutions 491

Barsukov G. V., Frolenkov K. Yu., Fetisov A. S., Vlasov V. V., Petrukhin A. V. Modeling the Application of a Polymer Protective Compound onto Abrasive Particles in a Fluidized Bed for Underwater Abrasive Water-Jet Cutting 505

Dorokhov R. V., Ferapontov Yu. A., Plotnikov M. Yu. Chemical Air Regeneration Unit 516

Mechanical Engineering. Metal Treatment 525

Tikhomirov V. A., Ermolov A. V., Kapranova A. B. Parametric Model of a Submersible Grinding Machine Unit 525

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

УДК 006.91
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.356-362

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ИСПРАВНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

© М. А. Каменская[1] ✉, П. И. Карелин[2], Т. И. Чернышова[2]

[1] *Кафедра «Электроэнергетика», art_mari@bk.ru;*
[2] *кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: аналитико-вероятностный метод; информационно-измерительная система; математическая модель; машинное обучение; межповерочный интервал; метрологическая исправность; метрологическая надежность; метрологический ресурс.

Аннотация: Рассмотрена задача определения метрологической исправности и метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем на этапах проектирования и эксплуатации. Предложен общий алгоритм, основанный на аналитико-вероятностном прогнозировании изменения метрологических характеристик с учетом параметров элементной базы и внешних влияющих факторов. На этапе проектирования выполнено построение многофакторной математической модели, позволяющей оценивать метрологический ресурс и прогнозируемый уровень метрологической исправности блока. На этапе эксплуатации осуществлен контроль результатов поверок, определение межповерочных интервалов и сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями. При выявлении расхождений предусмотрена коррекция математической модели с применением аппарата машинного обучения и стохастической подстройки корректирующих коэффициентов.

Введение

В современных условиях интенсивного развития информационно-измерительных систем (**ИИС**) обеспечение заданного уровня метрологической надежности (**МН**) является важной задачей, решение которой обеспечивает точность получаемых измерительных данных и качество принимаемых на их основе технических решений. Как известно, метрологическая надежность ИИС определяется метрологической надежностью аналоговых блоков (**АБ**), составляющих измерительный канал рассматриваемых измерительных средств как при проектировании, так и эксплуатации. Актуальность проблемы определения МН особенно возрастает при эксплуатации АБ ИИС в условиях варьирования внешних влияющих факторов – температуры, давления, влажности и других параметров окружающей среды, которые существенно влияют на изменение во времени метрологических характеристик (**МХ**) исследуемых блоков.

Традиционные подходы к метрологическому обеспечению ИИС, базирующиеся на периодических поверочных работах с фиксированными межповерочны-

ми интервалами, не позволяют оперативно учитывать реальную динамику изменения во времени МХ АБ и качественно прогнозировать метрологический ресурс блока, что приводит к избыточным затратам на чрезмерно частые поверки. Отсутствие единой методологии, объединяющей этапы проектирования и эксплуатации ИИС, затрудняет определение МН на всех этапах жизненного цикла информационно-измерительных систем.

Предложен общий алгоритм, заключающийся в определении показателей МН и уровня прогнозируемой метрологической исправности АБ ИИС на этапе их проектирования, контроле показателей МН на этапе эксплуатации при проведении поверочных работ, а также позволяющий в случае необходимости корректировать показатели МН при эксплуатации блоков в структуре ИИС.

Блок-схема общего алгоритма, позволяющего контролировать метрологическую исправность и МН на этапе проектирования и эксплуатации блоков, представлена на рис. 1.

Методология оценки метрологического уровня блоков информационно-измерительных систем

Рассмотрим основные этапы предлагаемой методологии, объединяющей этапы исследования блоков при их проектировании и эксплуатации. Исходными данными для решения задачи являются параметры элементной базы проектируемого АБ, условия его эксплуатации, структурная и принципиальная схемы блока. Эта априорная информация формирует базу данных (**БД**). В основу определения МН на этапе проектирования положен аналитико-вероятностный метод прогнозирования состояния МХ исследуемых блоков и оценки выбранного показателя МН [1].

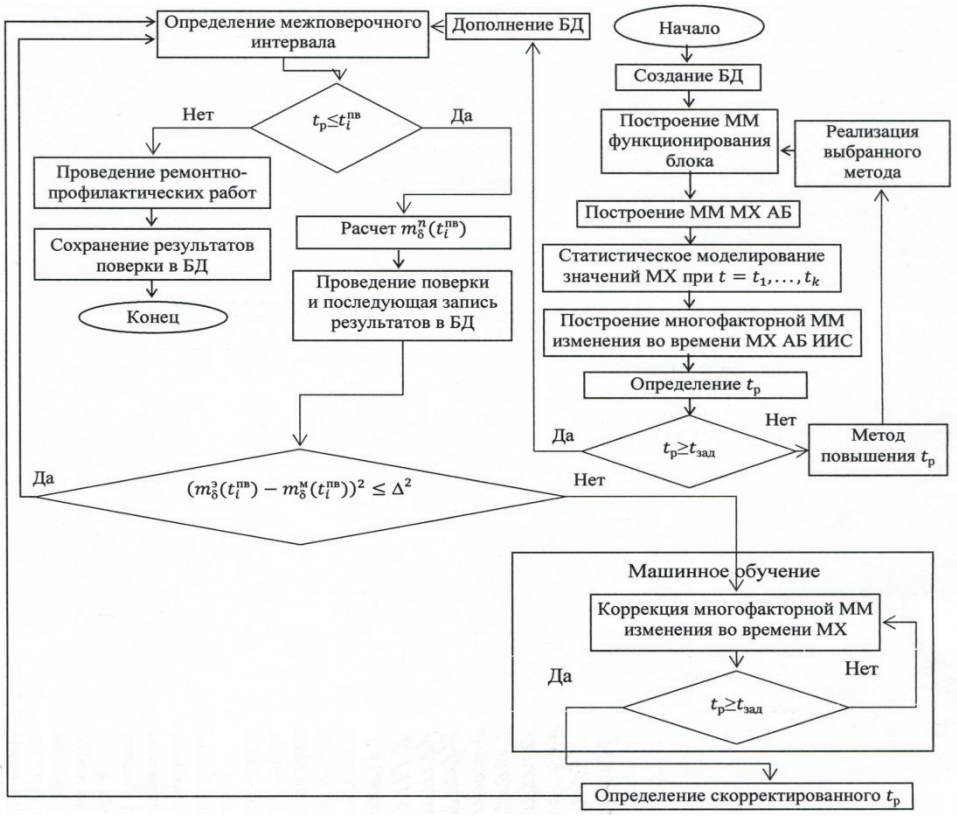


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения метрологической исправности, объединяющая этапы проектирования и эксплуатации

Метод заключается в последовательном построении математических моделей, позволяющих дать вероятностную оценку требуемого показателя МН и прогнозируемого уровня метрологической исправности АБ. Как правило, в качестве основного показателя метрологической надежности выбирается метрологический ресурс $t_{\text{р}}$.

На начальном этапе строится математическая модель функционирования АБ, общий вид которой определяется как

$$y = F_1\left(x, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), \tag{1}$$

где y, x – выходной и входной сигналы соответственно; $\vec{\xi} = \left\{\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, ..., \vec{\xi}_m\right\}$ – вектор параметров элементной базы блока; $\vec{\varphi} = \left\{\vec{\varphi}_1, \vec{\varphi}_2, ..., \vec{\varphi}_m\right\}$ – вектор внешних влияющих факторов (температуры, давления, влажности и т.д.).

На основе выражения (1) формируется математическая модель МХ

$$S = F_2\left(x, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), \tag{2}$$

где S – исследуемая метрологическая характеристика АБ, позволяющая определить уровень метрологической исправности блока. Как правило, в качестве такой характеристики выступает погрешность блока δ [2].

Согласно (2), изменение во времени исследуемой МХ определяется изменением в процессе эксплуатации параметров элементной базы $\vec{\xi}(t)$ при варьировании внешних факторов $\vec{\varphi} = \text{var}$.

Для расчета значений МХ по модели вида (2) в произвольных точках контроля $t = t_1, ..., t_k$ реализуется процедура статистического моделирования в виде значений математического ожидания $m_S\left(t_i, \vec{\varphi}\right)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_\delta\left(t_i, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), i = 1, ..., k,$ которые являются основой для построения многофакторной математической модели изменения во времени исследуемой МХ:

$$\begin{cases} M_\delta\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right); \\ \psi_{\pm\sigma}\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right) = m_\delta\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right) \pm c\sigma_\delta\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), \end{cases} \tag{3}$$

где c – коэффициент, выбираемый с учетом принятого уровня доверительной вероятности.

Построенная модели вида (3) позволяет дать вероятностную оценку величины метрологического ресурса $t_{\text{р}}$, а также формирует дополнения в БД по уровню метрологической надежности блока на прогнозируемый интервал эксплуатации.

На этапе проектирования возможно решение задач, направленных на повышение $t_{\text{р}}$, если рассчитанное значение этого показателя по математической модели не соответствует значениям, указанным в техническом задании на проектирование блока. Реализация выбранного метода (например, метода параметрической оптимизации) позволяет провести коррекцию значения $t_{\text{р}}$ в соответствии с требуемым значением уровня МН для рассматриваемого блока.

На этапе эксплуатации осуществляется последовательное определение межповерочного интервала с учетом выбранного вида математической модели изменение во времени МХ, расчет результатов поверок и сравнение данных, полученных при поверках, и данных, рассчитанных по математической модели вида (3). Полученные экспериментальные данные по контролю метрологической исправности блока при поверках заносятся в БД.

При этом осуществляется текущий контроль значений времени проведения поверок, сопоставление их с величиной метрологического ресурса $t_{\text{р}}$ для исключения возможности функционирования блока при нарушении его метрологической исправности. Если $t_i^{\text{пв}} \geq t_{\text{р}}$, выносится решение о проведении ремонтно-профилактических работ либо по замене блока на метрологически исправный. В случае, когда результаты поверок $m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_i^{\text{пв}}\right)$ и расчетов МХ по модели $m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_i^{\text{пв}}\right)$ (3) отличаются в пределах заданной точности Δ, то есть

$$\left(m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_i^{\text{пв}}\right) - m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_i^{\text{пв}}\right)\right)^2 < \Delta^2, \tag{4}$$

процедура определения времени поверок, их проведение и пополнение БД продолжается с применением действующей математической модели вида (3). Уровень точности Δ устанавливается, исходя из требований по точности к проектируемому блоку и ответственности выполняемых им функций в структуре измерительного канала ИИС. Как правило, значение Δ может быть установлено в пределах 3 – 5 %.

При нарушении условия (4) при анализе результатов поверочных работ, то есть, если

$$\left(m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_n^{\text{пв}}\right) - m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_n^{\text{пв}}\right)\right)^2 \geq \Delta^2, \tag{5}$$

проводится коррекция многофакторной математической модели вида (3) для повышения уровня ее адекватности и последующего использования в процедуре определения межповерочных интервалов на этапе эксплуатации.

Процедура коррекции математической модели осуществляется с помощью аппарата машинного обучения с использованием метода стохастической подстройки многофакторной математической модели вида (3) с последующей верификацией полученных результатов по значениям корректирующих коэффициентов. При этом устанавливается оптимальный уровень корректирующих коэффициентов модели (3) по минимуму рассогласований данных моделей и эксперимента (поверки). Таким образом, окончательный вид скорректированной математической модели вида (3) устанавливается при выполнении неравенства

$$\left(m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_n^{\text{пов}}\right) - m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_n\right)\right)^2 < \Delta^2. \tag{6}$$

Полученная скорректированная многофакторная математическая модель позволяет получить уточненное или скорректированное значение оценки $t_{\text{р}}^{*}$, величина которого в дальнейшей эксплуатации блока будет использоваться на последующих этапах его работы для контроля уровня метрологической исправности и обеспечения верификации экспериментов, реализуемых с применением исследуемого аналогового блока в структуре ИИС.

Разработанная методология, объединяющая этапы проектирования и эксплуатации, может быть реализована в виде информационно-аналитической системы (**ИАС**). Данная система реализует алгоритмизацию математического аппарата аналитико-вероятностного прогнозирования для обеспечения автоматизированного расчета МХ аналоговых блоков информационно-измерительных систем. Кроме того, ИАС осуществляет контроль метрологической надежности и метрологической исправности блоков в процессе эксплуатации при проведении поверочных работ и позволяет при необходимости оперативно корректировать математическую модель изменения во времени МХ аналоговых блоков, повышая уровень ее

адекватности реальным условиям функционирования ИИС. Система предназначена для оперативной поддержки принятия проектных, технических и эксплуатационных решений в области метрологического обеспечения блоков ИИС, исключая необходимость ручного выполнения трудоемких аналитических вычислений. Информационно-аналитическая система не только автоматизирует сложные аналитические расчеты, но и формирует обоснованные инженерные рекомендации по метрологическому обслуживанию, что способствует повышению качества функционирования ИИС на всех этапах их жизненного цикла за счет реализации следующих стадий:

– построения математических моделей изменения во времени метрологических характеристик аналоговых блоков ИИС на основе априорной информации из БД по комплектующим элементам с использованием многофакторных математических моделей;

– проверки адекватности построенных моделей реальным процессам с применением статистических критериев, что позволяет оценить целесообразность их использования с учетом поставленной задачи прогнозирования и требуемого уровня МН;

– формирования рекомендаций по метрологическому обслуживанию, включая расчет межповерочных интервалов на основе условия постоянства степени накопления метрологической нестабильности [3];

– расчета показателей качества прогнозирования МН и оптимального выбора математической модели изменения МХ во времени на их основе [1, 4];

– коррекции (при необходимости) многофакторной математической модели для уточнения оценки значений метрологического ресурса $t_{\text{р}}^{*}$, с последующим контролем уровня метрологической исправности на этапе эксплуатации.

Заключение

Таким образом, использование информационно-аналитической системы на этапах проектирования и эксплуатации позволяет комплексно оценивать метрологическую надежность как отдельных аналоговых блоков, так и измерительных каналов ИИС в целом, что позволяет решать задачи повышения метрологического уровня используемых измерительных средств путем внесения необходимых изменений в схемные и конструктивные решения проектируемых блоков и информационно-измерительной системы в целом.

Список литературы

1. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209–215.

2. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование электронных измерительных средств при оценке их метрологической надежности / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 770–775.

3. Чернышова, Т. И. Оценка достоверности прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 532–537.

4. Чернышова, Т. И. Оценка эффективности прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств/ Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 3(47). – С. 301–305.

Determination of Metrological Serviceability and Metrological Reliability of Information-Measurement Systems during Design and Operation

© M. A. Kamenskaya[1] ✉, P. I. Karelin[2], T. I. Chernyshova[2]

[1] *Department of Electric Power Engineering, art_mari@bk.ru;*
[2] *Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems, TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: analytical-probabilistic method; information-measurement system; mathematical model; machine learning; calibration interval; metrological serviceability; metrological reliability; metrological service life.

Abstract: The problem of determining the metrological serviceability and metrological reliability of analog units within information-measurement systems during the design and operation stages is addressed. A general algorithm is proposed, based on analytical-probabilistic forecasting of changes in metrological characteristics, taking into account component parameters and external influencing factors. At the design stage, a multifactorial mathematical model is constructed to evaluate the metrological service life and the predicted level of the unit's metrological serviceability. At the operation stage, calibration results are monitored, calibration intervals are determined, and experimental data are compared with calculated values. If discrepancies are detected, the mathematical model is adjusted using machine learning techniques and the stochastic tuning of correction coefficients.

References

1. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R. Yu. [Mathematical modeling of metrological characteristics in the assessment of the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 209-215. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Mathematical modeling of electronic measuring instruments for the assessment of their metrological reliability], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 770-775. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Assessing the reliability of forecasting metrological reliability of electronic measuring device], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 532-537. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Assessing the reliability of forecasting the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2013, no. 3(47), pp. 301-305. (In Russ., abstract in Eng.)

Bestimmung der messtechnischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Informations- und Messsystemen während ihrer Entwicklung und ihres Betriebs

Zusammenfassung: Dieser Artikel untersucht die Bestimmung der messtechnischen Einsatzfähigkeit und Zuverlässigkeit analoger Einheiten von Informations- und Messsystemen in der Entwurfs- und Betriebsphase. Es ist ein allgemeiner Algorithmus vorgeschlagen, der auf analytischer und probabilistischer Prognose von Änderungen messtechnischer Eigenschaften basiert und die Parameter der Elementbasis sowie externe Einflussfaktoren berücksichtigt. In der Entwurfsphase ist ein multifaktorielles mathematisches Modell erstellt, um die messtechnischen Ressourcen und die prognostizierte messtechnische Einsatzfähigkeit der Einheit zu bewerten. Während der Betriebsphase waren die Verifizierungsergebnisse überwacht, die Verifizierungsintervalle festgelegt und die experimentellen Daten mit den berechneten Werten verglichen. Bei festgestellten Abweichungen wird das mathematische Modell mithilfe von maschinellem Lernen und stochastischer Anpassung der Korrekturkoeffizienten korrigiert.

Détermination de l'intégrité métrologique et de la fiabilité métrologique des systèmes d'information et de mesure dans leurs conception et exploitation

Résumé: Est examinée la problématique de la détermination de l'intégrité métrologique et de la fiabilité métrologique des blocs analogues des systèmes d'information et de mesure aux étapes de conception et d'exploitation. Est proposé un algorithme general fondé sur une prévision analytique et probabiliste des modifications des caractéristiques métrologiques en tenant compte des paramètres de la base électronique et des facteurs externes influençants. À l'étape de la conception, est élaborée une modélisation mathématique multifactorielle permettant d'évaluer la durée de vie métrologique et le niveau prévisible d'intégrité métrologique du bloc. Lors de la phase d'exploitation, est effectué le contrôle des résultats des verifications; sont déterminés les intervalles entre les verifications; sont comparées les données expérimentales aux valeurs calculées. En cas d'écart détecté, est prévue une correction du modèle mathématique en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique et un ajustement stochastique des coefficients correctifs.

Авторы: ***Каменская Мария Анатольевна*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика»; ***Карелин Павел Игоревич*** – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; ***Чернышова Татьяна Ивановна*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 654.078
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.363-372

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МНОЖЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМОЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© В. В. Алексеев[1] ✉, Е. В. Емельянов[2], Д. А. Иванов[3], И. Г. Рыжов[3]

[1] *Кафедра «Информационные системы и защита информации», vvalex1961@mail.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[2] *АО «Автодор-Эксплуатация», Москва, Российская Федерация;*
[3] *кафедра механики и процессов управления, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», Москва, Российская Федерация*

Ключевые слова: внешний фактор; зона покрытия; интегральный показатель качества; метод анализа иерархий; многокритериальный анализ; нечеткое отношение; поддержка принятия решения; система специального назначения.

Аннотация: Представлен алгоритм поддержки принятия решения, основанный на многокритериальном анализе альтернатив с использованием методов анализа иерархий, парных сравнений и нечетких отношений предпочтения. На примере управления зонами покрытия системы мобильной связи показано, что потенциальные возможности алгоритма позволяют осуществить выбор рационального управляющего воздействия на основе интегральной оценки качества функционирования системы в условиях воздействия внешних факторов.

Введение

Современные системы специального назначения (**ССН**) функционируют в условиях непрерывного изменения как внутренних, так и внешних факторов. Так, для систем мобильной связи (**СМС**) такими параметрами являются изменения пользовательской нагрузки, состояния среды распространения радиоволн, условия электромагнитной совместимости и т.п. Изменение указанных факторов приводит к ухудшению характеристик зоны покрытия и снижению качества обслуживания пользователей, что повышает необходимость оперативного формирования управляющего воздействия на исполнительные механизмы СМС. Известно, что в организационно-технических системах, к каким относятся ССН и СМС, в частности, процесс управления сопровождается процессом поддержки принятия решения, который в свою очередь для СМС определяется полнотой информации о состоянии сети и необходимостью выбора наиболее рационального управляющего воздействия из множества допустимых альтернатив. В этих условиях, в частности, задача управления зонами покрытия приобретает многокритериальный характер и требует применения формализованных методов поддержки принятия решения. Практическая реализация моделей управления зонами покрытия в современных СМС осуществляется посредством централизованных контуров управления системой, опираясь на схему, представленную в работе [1].

Цель исследования – повышение эффективности управления ССН в условиях динамического изменения воздействия внешних факторов.

Постановка задачи многокритериального выбора управляющего воздействия при управлении зонами покрытия

Исследование существующих подходов применительно к СМС показало, что управление зонами покрытия развивалось преимущественно по двум направлениям: совершенствование методов расчета радиопокрытия и развитие механизмов адаптивной настройки параметров сети. Первое направление обеспечивало оценку условий распространения сигнала и прогнозирование зоны обслуживания, второе – изменение параметров функционирования сети в процессе эксплуатации. Однако применение указанных подходов осуществлялось раздельно, вследствие чего изменение нагрузки, воздействие внешних факторов и изменение качества обслуживания учитывались независимо друг от друга. В процессе исследования подтверждено, что фактическое состояние зоны покрытия определяется не только отдельными параметрами, но и их совокупным влиянием друг на друга. Изменение уровня сигнала приводило к перераспределению пользовательской нагрузки, рост нагрузки вызывал изменение доступности ресурсов, а ухудшение качества обслуживания изменяло распределение абонентов между соседними зонами обслуживания. Обеспечение качества функционирования СМС в условиях динамического изменения нагрузки и воздействия внешних факторов требует организации поддержки принятия решения по управлению зонами покрытия [2]. Зона покрытия рассматривается не как проектный параметр, а как управляемое состояние СМС, изменяющееся под действием пользовательской нагрузки и внешних факторов [3].

В связи с этим для организации поддержки принятия решения при управлении зонами покрытия СМС предложено ввести интегральный показатель качества функционирования $Q(z)$, который объединяет все ключевые характеристики зоны покрытия [4 – 7]: уровень сигнала $P_{\text{signal}}(z)$, пропускную способность сети $C_{\text{channel}}(z)$, нагрузку сети $L_{\text{load}}(z)$, задержку передачи данных $D_{\text{latency}}(z)$, и записан выражением

$$Q(z) = w_1 f_1\left(P_{\text{signal}}(z)\right) + w_2 f_2\left(C_{\text{channel}}(z)\right) + w_3 f_3\left(D_{\text{latency}}(z)\right) + w_4 f_4\left(L_{\text{load}}(z)\right). \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет количественно оценить текущее состояние зоны покрытия и определить необходимость выполнения управляющего воздействия. Вместе с тем значение интегрального показателя качества само по себе не определяет способ управления сетью. При возникновении неблагоприятного состояния зоны покрытия система может сформировать несколько допустимых вариантов изменения параметров сети, каждый из которых обеспечивает различный уровень эффективности, имеет собственные ограничения применения и по-разному влияет на качество обслуживания пользователей. К множеству возможных управляющих воздействий могут относиться изменение параметров излучения базовых станций, корректировка угла наклона антенных систем, перераспределение пользовательской нагрузки между соседними сотами, изменение параметров процедуры handover, балансировка радиоресурсов и другие мероприятия, реализуемые средствами системы управления сетью. Следовательно, возникает задача выбора наиболее рационального управляющего воздействия из множества допустимых управляющих воздействий

$$U = \{u_1, u_2, ..., u_n\}, \quad (2)$$

где u_i – возможное управляющее воздействие, направленное на повышение качества функционирования системы.

Особенностью рассматриваемой задачи является необходимость одновременного учета большого количества факторов, оказывающих влияние на эффективность принимаемого решения. В отличие от классических задач модификации изменение одного параметра системы может приводить к разнонаправленному изменению ее остальных характеристик функционирования. Например, увеличение мощности передачи позволяет повысить уровень сигнала в зоне обслуживания, однако одновременно приводит к росту межсотовых помех и ухудшению качества обслуживания соседних сот [8]. Аналогичным образом перераспределение пользовательской нагрузки уменьшает перегрузку одной базовой станции, но способно увеличить нагрузку на соседние элементы сети.

Таким образом, выбор управляющего воздействия, в частности, для СМС, представляет собой многокритериальную задачу поддержки принятия решения, в которой необходимо одновременно учитывать изменение интегрального показателя качества функционирования сети $Q(z)$, прогнозируемую пользовательскую нагрузку, вероятность деградации зоны покрытия, показатели качества обслуживания пользователей, а также эксплуатационные ограничения сети.

Дополнительной особенностью рассматриваемой задачи является неопределенность исходной информации. Она обусловлена невозможностью полного описания состояния радиосреды, изменчивостью условий распространения радиоволн, динамическим характером пользовательской нагрузки и воздействием внешних факторов, оказывающих влияние на функционирование системы мобильной связи. Вследствие этого оценка эффективности различных вариантов управления не всегда может быть выполнена исключительно на основании количественных измерений и требует привлечения экспертных знаний о поведении сети в различных режимах эксплуатации.

С учетом изложенного задача выбора управляющего воздействия формализуется как задача многокритериального принятия решения, в которой каждой альтернативе ставится в соответствие совокупность количественных и качественных критериев оценки [9 – 11]. Для обеспечения комплексного анализа предлагается использовать иерархическую модель представления критериев, позволяющую совместно применять методы анализа иерархий, процедуры согласования экспертных оценок и аппарат нечетких множеств [12].

Иерархическая модель процесса принятия решения

Для формализации процесса выбора управляющего воздействия используется иерархическая модель принятия решения, состоящая из N уровней. Верхний уровень соответствует цели принятия решения, промежуточные уровни содержат критерии оценки, а нижний – представляет множество альтернатив управляющего воздействия.

Пусть L_i – множество элементов i-го уровня иерархии; m_i – число элементов на этом уровне. Тогда структура иерархии описывается выражением

$$H = \bigcup_{i=1}^{N} L_i = \bigcup_{i=1}^{N} \bigcup_{j=1}^{m_i} a_{i,j}, \tag{3}$$

где N – количество уровней иерархии; $a_{i,j}$ – отдельный элемент иерархии.

В общем случае количество уровней определяется степенью детализации модели принятия решения. В рамках настоящего исследования использована трехуровневая иерархия, поскольку она является достаточной для представления задачи выбора управляющего воздействия по управлению зонами покрытия СМС и не приводит к избыточному усложнению процедуры принятия решения. *Первый*

уровень соответствует цели принятия решения – выбору управляющего воздействия, обеспечивающего максимальное повышение интегрального показателя качества функционирования сети $Q(z)$. *Второй* – включает совокупность критериев, характеризующих состояние сети и ожидаемый эффект применения управляющих воздействий. *Третий* – образует множество допустимых альтернатив управления зоной покрытия мобильной связи.

Представление задачи в виде иерархической структуры позволяет перейти к формированию парных сравнений критериев и альтернатив, оценке их относительной значимости и последующему ранжированию вариантов управления с использованием методов многокритериального анализа и аппарата нечеткой логики [13]. Таким образом, на *втором* этапе сформированы парные сравнения критериев и вариантов управления зоной покрытия по шкале относительной важности $S'(m)$

$$a[i; j; k; m], \quad j = 1,...,l[i-1], \quad k = 1,...,l[i], \quad m = 1,...,l[i], \tag{4}$$

где $a[i; j; k; m]$ – степень предпочтения k-го элемента i-го уровня перед m-м элементом этого же уровня по отношению к j-му элементу вышестоящего уровня.

На *третьем* этапе из элементов $a[i; j; k; m]$ формируются обратносогласованные квадратные матрицы парных сравнений

$$A = \| a_{i,j} \|, \tag{5}$$

где $a_{i,j}$ принадлежит множеству $S'(m)$.

Количество матриц на каждом уровне, в данном случае, определяется количеством альтернатив на вышестоящем уровне, а количество строк и столбцов – количеством альтернатив на текущем уровне. Суммарное количество сформированных матриц вычисляется выражением

$$\sum_{I=1}^{n-1} l_i . \tag{6}$$

Матрицы формируются на основе парных сравнений экспертом альтернатив каждого уровня иерархии по отношению к каждой альтернативе вышестоящего уровня. Оценки производятся по шкале $S'(m)$. Это позволяет качественные оценки эксперта заменить на количественные на основе шкалы $S'(m)$, при этом будут получены обратно-симметричные матрицы.

На *четвертом* этапе осуществляется проверка согласованности суждений экспертов. Идет вычисление значения оценки согласованности (**ОС**). Если ОС меньше 20 % и удовлетворяет лицо, принимающее решение (**ЛПР**), то переходим к получению нечетких отношений нестрогих предпочтение, иначе переходим к корректировке экспертных оценок по желанию эксперта, возвращаемся к первому этапу [14 – 16]. С помощью метода многокритериального анализа, при удовлетворении согласованности, вычисляется вектор приоритетов по обратносогласованным матрицам

$$\lim_{k\to\infty} \frac{A^k e}{\| A^k \|} = cw, \quad \| A^k \| = e^{\mathrm{T}} A^k e, \tag{7}$$

где A – матрица попарных сравнений альтернатив или критериев; k – показатель степени матрицы, определяющий число последовательных итераций; e – единичный вектор, e^{T} – транспонированный вектор e; w – вектор приоритетов альтернатив или критериев; c – скалярный нормирующий множитель.

На *пятом* этапе формируются нечеткие отношения нестрогого предпочтения, позволяющие количественно учесть влияние внешних факторов:

$$R(\mu_R), \quad \mu_R \in [0;1], \tag{8}$$

где $R(\mu_R)$ – нечеткое отношение нестрогого предпочтения между рассматриваемыми альтернативами; μ_R – степень принадлежности пары альтернатив данному отношению.

На *шестом* этапе полученные данные обрабатываются двумя методами: методом анализа иерархий и методом принятия решения на базе нечеткой логики при нескольких отношениях нестрогого предпочтения с весовыми коэффициентами. Применение метода принятия решения на базе нечеткой логики, при удовлетворении транзитивной согласованности, позволяет вычислить значения вектора недоминируемости альтернатив

$$R^S = \frac{R}{R^{\text{т}}} \Rightarrow \mu_R^{nd}(v_i) = \min_{v_i \in V} \left\{ 1 - \mu_R^S(v_j, v_i) \right\} = 1 - \max_{v_j \in V} \left\{ \mu_R^S(v_j, v_i) \right\}, \tag{9}$$

где R^S – нечеткое отношение строгого предпочтения; $R^{\text{т}}$ – обратное (транспонированное) отношение предпочтения; V – множество рассматриваемых альтернатив; v_i – альтернатива, для которой определяется степень недоминируемости; v_j – альтернатива, с которой сравнивается v_i; $\mu_R^S(v_j, v_i)$ – степень строгого предпочтения альтернативы v_j перед v_i; $\mu_R^{nd}(v_i)$ – степень недоминируемости альтернативы v_i.

Сама процедура выделения области недоминируемых альтернатив реализуется следующими этапами:

1. Задание минимально допустимого уровня достижения цели по всем критериям $d_{\min}(k)$.
2. Сужение области альтернатив $\mu_R^{nd}(v_i) < d_{\min}(k)$.
3. Вычисление индексов согласия I_{ij} и $I_{ij} \Rightarrow$ выделение недоминируемых альтернатив v_i.

На *седьмом* этапе к результатам этих процедур $\arg\max w(v_i)$ и $\mu_R^{nd}(v_i)$ применяются алгоритмы иерархической свертки по векторам приоритетов вариантов и выделения области недоминируемых вариантов

$$\exists \frac{v_i}{v_i} = \arg\max w(v_i) = \mu_R^{nd}(v_i). \tag{10}$$

При удовлетворении равенства v_i – наилучшая альтернатива с наибольшим весом или вариант, недоминируемый другими. При условии высокой согласованности всех бинарных отношений, сформированных экспертами, оба алгоритма предложат одинаковое решение в качестве наиболее предпочтительного, иначе возвращаемся к корректировке экспертных оценок и проводим расчеты повторно.

Выражения (1) – (10) описывают алгоритм многокритериального выбора альтернатив, при принятии решения по управлению ССН, реализованный применительно к процессу управления зонами покрытия СМС.

Анализ результатов вычислительного эксперимента

Алгоритм многокритериального выбора альтернатив интегрирован в разработанную систему поддержки принятия решения при управлении зонами покрытия СМС, формируя замкнутый контур, в котором результаты оценки состояния сети используются для формирования управляющего воздействия [17], а эффективность принятого решения оценивается посредством расчета интегрального показателя качества функционирования.

Результаты вычислительного эксперимента по исследованию эффективности применения разработанного алгоритма при управлении зонами покрытия СМС представлены на рис. 1. По оси абсцисс отложены последовательные моменты времени наблюдения, а по оси ординат – значения интегрального показателя качества.

Полученные результаты показывают наличие трех характерных режимов функционирования системы. Область значений $Q(z) \geq 0{,}75$ принималась как нормативный режим функционирования, соответствующий устойчивому состоянию зоны покрытия и отсутствию необходимости изменения параметров системы.

Значения $0{,}50 \leq Q(z) < 0{,}75$ интерпретировались как область допустимого качества функционирования, при которой сохраняется работоспособность системы, однако возникает необходимость мониторинга состояния и применения локальных механизмов управления нагрузкой [18]. Значения $Q(z) < 0{,}50$ рассматривались как область деградации качества обслуживания и являлись основанием для формирования управляющих воздействий.

Анализ графика показывает, что исходное состояние системы (сценарий 0) характеризуется значением $Q(z) = 0{,}535$, что соответствует допустимому режиму функционирования. При переходе к сценарию 2 наблюдается снижение интегрального показателя до $Q(z) = 0{,}299$, обусловленное совместным ухудшением параметров радиодоступа и ростом пользовательской нагрузки. Полученные значения демонстрируют устойчивое снижение $Q(z)$ при совместном ухудшении параметров радиодоступа и росте пользовательской нагрузки. Максимальное значение показателя составило $Q(z) = 0{,}636$, что соответствует устойчивому состоянию сети, а минимальное значение $Q(z) = 0{,}214$ соответствует режиму деградации функционирования системы.

Полученный характер изменения интегрального показателя подтверждает чувствительность разработанной модели к изменению эксплуатационных параметров системы и показывает возможность использования показателя Q(z) в качестве основного критерия оценки состояния зоны покрытия при принятии решения

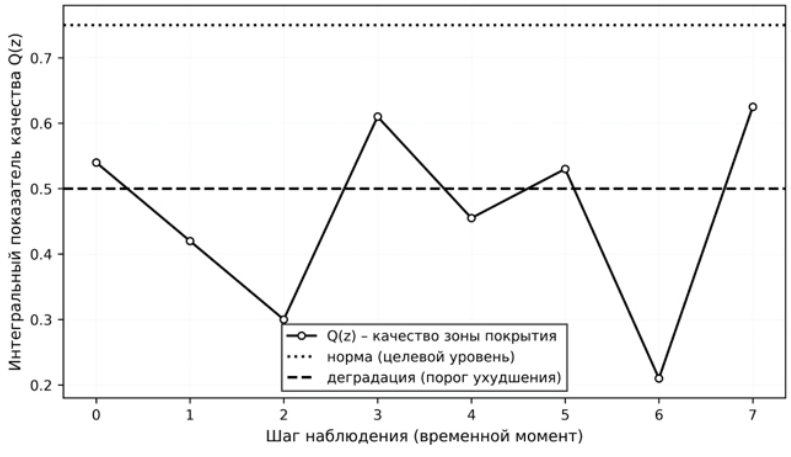


Рис. 1. Динамика изменения интегрального показателя качества

по управлению параметрами СМС. При достижении показателем $Q(z)$ критического значения система поддержки принятия решения автоматически инициирует выполнение разработанного алгоритма многокритериального выбора управляющего воздействия. По результатам анализа множества допустимых альтернатив выбирается воздействие, обеспечивающее наибольшее повышение качества функционирования системы [19].

После применения выбранного управляющего воздействия наблюдается увеличение значения интегрального показателя качества и его возврат в область допустимых значений. Таким образом, управление осуществляется не непрерывно, а только в моменты возникновения деградации зоны покрытия, что позволяет минимизировать количество управляющих воздействий и одновременно поддерживать требуемый уровень качества обслуживания пользователей.

Представленные на рисунке результаты подтверждают, что разработанный алгоритм обеспечивает своевременное обнаружение ухудшения состояния зоны покрытия, выбор рационального управляющего воздействия и восстановление требуемого уровня качества функционирования сети. Это свидетельствует об эффективности применения предложенного алгоритма в составе системы поддержки принятия решения [20].

Для оценки эффективности проведен вычислительный эксперимент, в котором моделировались различные состояния зоны покрытия СМС, отличающиеся интенсивностью пользовательской нагрузки, условиями распространения радиосигнала и характеристиками передачи данных. Для каждого состояния вычислялся интегральный показатель качества функционирования сети $Q(z)$. При снижении качества ниже установленного уровня формировалось множество допустимых управляющих воздействий, выбор которых осуществлялся разработанным алгоритмом многокритериального принятия решения.

Заключение

Показано, что разработанный алгоритм формирования управляющих воздействий в системе поддержки принятия решения эффективен при управлении зонами покрытия СМС. В основе алгоритма лежат методы иерархического представления задачи, парного сравнения альтернатив, оценки согласованности экспертных суждений и формирования нечетких отношений предпочтения, что позволяет учитывать одновременно количественные показатели состояния системы и неопределенность исходной информации. Представленный алгоритм отличается использованием интегрального показателя качества функционирования зоны покрытия $Q(z)$ при формировании и ранжировании допустимых управляющих воздействий. При снижении значения показателя ниже установленного порога алгоритм обеспечивает выбор воздействия, направленного на возврат системы в допустимую область функционирования. Результаты вычислительного эксперимента подтвердили возможность восстановления значения $Q(z)$ после его снижения вследствие изменения нагрузки и воздействия внешних факторов. Дальнейшим направлением исследования являются совершенствование методов прогнозирования изменения состояния зоны покрытия, развитие правил автоматического формирования множества допустимых управляющих воздействий, уточнение критериев их оценки и экспериментальная проверка разработанного алгоритма на эксплуатационных данных СМС.

Список литературы

1. Берлин, А. Н. Цифровые сотовые системы связи / А. Н. Берлин. – Москва : Эко-Трендз, 2007. – 292 с.

2. Иванов, Д. А. Системный подход к организации структуры управления мобильной сетью в интересах обеспечения устойчивости связи / Д. А. Иванов, В. В. Алексеев, И. Г. Рыжов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 2. – С. 259–268. doi: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.259-268

3. Слепов, Н. Н. Англо-русский толковый словарь сокращений в области связи и новых информационных технологий = Acronyms and abbreviations an English-Russian dictionary for communications and modern information sciences : около 42 000 терминов и словарь русских сокращений : около 7 400 терминов / Н. Н. Слепов. – 4-е изд., доп. и перераб. – Москва : Техносфера, 2013. – 794 с.

4. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир ; пер. с англ. М. А. Зуева ; под ред. А. И. Горлина. – Москва : Радио и связь, 1990. – 538 с.

5. Соболь, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – Москва : Наука, 1981. – 110 с.

6. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в Волшебных Странах : учебник / О. И. Ларичев. – Москва : Логос, 2000. – 296 с.

7. Юдин, Д. Б. Вычислительные методы теории принятия решений / Д. Б. Юдин. – Москва : Наука, 1989. – 316 с.

8. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач : монография / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Физматлит, 2007. – 254 с.

9. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа : учебное пособие для вузов / Н. Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1981. – 488 с.

10. Новиков, Д. А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем / Д. А. Новиков. – Москва : Фонд «Проблемы управления», 1999. – 160 с.

11. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – Москва : Наука, 1986. – 284 с.

12. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation / T. L. Saaty. – New York : McGraw-Hill, 1980. – 287 p.

13. Борисов, А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.

14. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьева, Н. Н. Слядзь, В. И. Глушков. – Москва : Радио и связь, 1989. – 302 с.

15. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – Москва : Наука, 1981. – 208 с.

16. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств в управлении предприятиями / А. Кофман, Х. Хил Алуха. – Минск : Вышэйшая школа, 1992. – 224 с.

17. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, No. 3. – P. 338–353.

18. Bellman, R. E. Decision-making in a fuzzy environment / R. E. Bellman, L. A. Zadeh // Management Science. – 1970. – Vol. 17, No. 4. – P. B141–B164.

19. Моделирование и оптимизация процессов управления информационно-телекоммуникационными системами / Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, Ю. П. Преображенский, Т. В. Аветисян // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 41–48. doi: 10.18127/j5604128-202403-05

20. A Multi-Criteria Approach to Decision Making in Broadband Network Deployment / M. Araújo, L. Ekenberg, M. Danielson, J. Confraria // Group Decision and Negotiation. – 2022. – Vol. 31, No. 4. – pp. 387–418. doi: 10.1007/s10726-021-09772-9

Algorithm for Generating Control Actions from a Set of Alternatives in the Management of a Special-Purpose System

© V. V. Alekseev[1] ✉, E. V. Emelyanov[2], D. A. Ivanov[3], I. G. Ryzhov[3]

[1] *Department of Information Systems and Information Protection, vvalex1961@mail.ru, TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[2] *JSC Avtodor-Expluatatsiya, Moscow, Russian Federation;*
[3] *Department of Mechanics and Control Processes, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation*

Keywords: external factor; coverage area; integral quality indicator; analytic hierarchy process; multi-criteria analysis; fuzzy relation; decision support; special-purpose system.

Abstract: The article describes a decision support algorithm based on the multi-criteria analysis of alternatives using the analytic hierarchy process, pair wise comparisons, and fuzzy preference relations. Using the management of mobile communication system coverage areas as an example, it is demonstrated that the algorithm's capabilities allow for the selection of a rational control action based on an integral assessment of system performance under the influence of external factors.

References

1. Berlin A.N. *Tsifrovye sotovye sistemy svyazi* [Digital Cellular Communication Systems], Moscow: Eko-Trendz, 2007, 292 p. (In Russ.)

2. Ivanov D.A., Alekseev V.V., Ryzhov I.G. [A Systems Approach to Organizing the Mobile Network Management Structure to Ensure Communication Stability], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 2, pp. 259-268. doi: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.259-268 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Slepov N.N. [Acronyms and abbreviations an English-Russian dictionary for communications and modern information sciences], Moscow: Tekhnosfera, 2013, 794 p. (In Russ.)

4. Klir J. *Sistemologiya. Avtomatizatsiya resheniya sistemnykh zadach* [Systemology. Automation of Systems Problem Solving], Moscow: Radio i svyaz', 1990, 538 p. (In Russ.)

5. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of Optimal Parameters in Multicriteria Problems], Moscow: Nauka, 1981, 110 p. (In Russ.)

6. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe khronika sobytiy v Volshebnykh Stranakh: uchebnik* [Theory and Methods of Decision Making, and the Chronicle of Events in Magical Countries], Moscow: Logos, 2000, 296 p. (In Russ.)

7. Yudin D.B. *Vychislitel'nyye metody teorii prinyatiya resheniy* [Computational Methods of Decision-Making Theory], Moscow: Nauka, 1989, 316 p. (In Russ.)

8. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nyye resheniya mnogokriterial'nykh zadach: monografiya* [Pareto-Optimal Solutions to Multi-Criteria Problems: Monograph], Moscow: Fizmatlit, 2007, 254 p. (In Russ.)

9. Moiseyev N.N. *Matematicheskiye zadachi sistemnogo analiza : uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Mathematical Problems of Systems Analysis : Textbook for Higher Education Institutions], Moscow: Nauka, 1981, 488 p. (In Russ.)

10. Novikov D.A. *Mekhanizmy funktsionirovaniya mnogourovnevykh organizatsionnykh sistem* [Mechanisms of Functioning of Multilevel Organizational Systems], Moscow: Fond "Problemy upravleniya", 1999, 160 p. (In Russ.)

11. Pospelov D.A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika* [Situational Control: Theory and Practice], Moscow: Nauka, 1986, 288 p. (In Russ.)

12. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, New York: McGraw-Hill, 1980, 287 p.

13. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Prinyatie reshenii na osnove nechetkikh modelei: primery ispol'zovaniya* [Decision Making Based on Fuzzy Models: Examples of Application], Riga: Zinatne, 1990, 184 p. (In Russ.)

14. Borisov A.N., Alekseev A.V., Merkur'eva G.V., Slyadz' N.N., Glushkov V.I. *Obrabotka nechetkoi informatsii v sistemakh prinyatiya reshenii* [Processing of Fuzzy Information in Decision-Making Systems]. Moscow: Radio isvyaz', 1989, 302 p. (In Russ.)

15. Orlovskii S.A. *Problemy prinyatiya reshenii pri nechetkoi iskhodnoi informatsii* [Decision-Making Problems under Fuzzy Initial Information], Moscow: Nauka, 1981, 208 p. (In Russ.)

16. Kofman A., Khil Alukha Kh. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv v upravlenii predpriyatiyami* [Introduction to the Theory of Fuzzy Sets in Enterprise Management], Minsk: Vysheishaya shkola, 1992, 224 p. (In Russ.)

17. Zadeh L.A. Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338-353.

18. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision-making in a fuzzy environment, *Management Science*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. B141-B164.

19. L'vovich Ya.Ye., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Avetisyan T.V. [Modeling and Optimization of Management Processes for Information and Telecommunication Systems], *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2024, vol. 29, no. 3, pp. 41-48. doi: 10.18127/j5604128-202403-05 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Araújo M., Ekenberg L., Danielson M., Confraria J. A Multi-Criteria Approach to Decision Making in Broadband Network Deployment, *Group Decision and Negotiation*, 2022, vol. 31, no. 4, pp. 387-418. doi: 10.1007/s10726-021-09772-9

Algorithmus zur Bildung von Steuereffekten auf einer Menge der Alternativen bei der Steuerung des Spezialsystems

Zusammenfassung: Es ist ein Entscheidungsunterstützungsalgorithmus vorgestellt, der auf einer multikriteriellen Analyse von Alternativen mittels analytischem Hierarchieprozess, Paarvergleichen und Fuzzy-Präferenzrelationen basiert. Am Beispiel der Verwaltung von Mobilfunknetzabdeckungsgebieten ist das Potenzial des Algorithmus demonstriert, die Auswahl rationaler Steuerungsmaßnahmen auf Grundlage einer integrierten Bewertung der Systemleistung unter dem Einfluss externer Faktoren zu ermöglichen.

Algorithme de la formation des influences de commande sur une variété d'alternatives dans la gestion d'un système à usage spécial

Résumé: Est présenté un algorithme d'aide à la décision basé sur une analyse multicritère des alternatives utilisant des méthodes d'analyse de hiérarchie, des comparaisons par paires et des relations de préférence floues. À l'exemple de la gestion des zones de couverture d'un système de téléphonie mobile, il est démontré que les possibilités potentielles de l'algorithme permettent de choisir une action de la commande rationnelle àr la base d'une évaluation intégrale de la qualité du fonctionnement du système dans des conditions de l'action des facteurs externes.

Авторы: ***Алексеев Владимир Витальевич*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; ***Емельянов Евгений Валентинович*** – ведущий специалист АО «Автодор-Эксплуатация», Москва, Российская Федерация; ***Иванов Дмитрий Александрович*** – аспирант кафедры механики и процессов управления; ***Рыжов Илья Геннадьевич*** – аспирант кафедры механики и процессов управления, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», Москва, Российская Федерация.

УДК 004.8:004.946:331.363
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.373-389

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ НА БАЗЕ ИММЕРСИВНЫХ СИСТЕМ

© А. Ю. Свешников[1] ✉, Ю. В. Никитников[1], М. А. Шильцын[1], Д. Л. Дедов[2]

[1] *Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», hammer68@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[2] *Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: большие языковые модели; виртуальные тренажеры; иммерсивные системы; профессиональная подготовка; ранжирование альтернатив; рекомендательные системы; система поддержки принятия решений; цифровой профиль сотрудника.

Аннотация: Рассмотрена возможность применения локальных больших языковых моделей (LLM) для ранжирования виртуальных тренажеров и иммерсивных средств профессиональной подготовки по цифровому профилю сотрудника. Поставлена задача семантического ранжирования с использованием LLM на основе анализа слабоструктурированных сведений о пользователе и их сопоставления с каталогом доступных тренажерных решений. Экспериментальная оценка выполнена на наборе из 20 цифровых профилей сотрудников различных отраслей и каталоге виртуальных тренажеров, охватывающих различные сферы (охрану труда, электробезопасность, пожарную безопасность, эвакуацию, первую помощь и т.д.). В сравнении участвовали десять локальных LLM. Качество рекомендаций оценивалось по различным метрикам точности, дополнительно анализировались структурированная валидность ответа, корректность возвращаемых кодов тренажеров и среднее время выполнения. Сделан вывод о применимости локальных LLM как интеллектуального компонента системы поддержки выбора иммерсивных средств профессиональной подготовки.

Введение

Профессиональная подготовка персонала в технических, промышленных, медицинских, энергетических организациях для обеспечения высокой эффективности активно применяет виртуальные и иммерсивные технологии [1, 2].

Виртуальные тренажеры позволяют воспроизводить опасные, редкие или дорогостоящие производственные ситуации без прямого риска для работника и оборудования. За счет интерактивной среды обучаемый может отрабатывать действия в условиях пожара, эвакуации, работы на высоте, взаимодействия с оборудованием, управления транспортно-складской техникой, проведения первой помощи или выполнения регламентных операций в аварийной ситуации [3, 4]. Развитие этой отрасли приводит к внедрению в обучающие средства программно-аппаратных комплексов, включая имитационные компоненты, системы захвата движений, обратной связи, экзоскелетные модули, что позволяет повысить реалистичность и качество профессиональной подготовки [5, 6].

Однако расширение набора обучающих средств, широкое варьирование их сложности и стоимости приводит к необходимости решения методологической задачи по выбору и компоновке тренажеров в индивидуальную образовательную траекторию, минимально достаточную для выработки требуемых компетенций у обучаемого. Для автоматизации поддержка принятия решений в этой области необходимо учитывать не только отрасль и должность обучаемого, но и уровень его базовой подготовки, стаж, должностные обязанности и индивидуальные особенности [7, 8].

Традиционные подходы к назначению учебных модулей обычно строятся на экспертных правилах, матрицах компетенций, должностных инструкциях и типовых программах обучения [9, 10]. Эти механизмы хорошо работают для формализованных требований, например при назначении обязательного вводного инструктажа или периодической проверки знаний. Но когда профиль сотрудника является набором слабоструктурированной информации (описание истории тренировок, характеристика, оценки), то автоматизированная обработка таких данных затруднена. В рамках данной предметной области мы рассматриваем задачу сопоставления такого цифрового профиля с набором доступных средств подготовки и получение на основе анализа профиля упорядоченного (ранжированного) списка альтернатив. Тогда первая позиция такого списка соответствует основному рекомендуемому тренажеру, а последующие позиции формируют расширенную траекторию подготовки.

Большие языковые модели (LLM) являются перспективным инструментом для решения данной задачи, поскольку способны интерпретировать естественно-языковые описания, извлекать смысловые признаки из слабоструктурированных профилей и сопоставлять их с описаниями учебно-тренировочных средств. В отличие от классической модели машинного обучения, требующей заранее подготовленного большого размеченного набора признаков, LLM может работать с комбинированным представлением: результатами входного тестирования, описанием профессиональной роли, перечнем компетентностных дефицитов, историей ошибок и текстовыми характеристиками тренажеров. Это позволяет использовать LLM в качестве основы системы поддержки принятия решений при организации профессиональной подготовки.

Вместе с тем применение LLM включает и ряд возможных ограничений: возвращенный моделью ответ не соответствовать заданной структуре, включать повторы и артефакты; прогноз модели может быть некорректным и нерелевантным для пользователя. Таким образом, без строгой, комплексной оценки модели ее применение для решения поставленной задачи невозможно.

Цель работы – исследование возможности применения локальных больших языковых моделей для выбора виртуальных тренажеров и иммерсивных средств профессиональной подготовки на основе цифрового профиля сотрудника. Для достижения поставленной цели формализуется цифровой профиль сотрудника и каталог виртуальных тренажеров, разрабатывается единый протокол формирования запроса к LLM и выполняется сравнительная оценка локальных LLM по метрикам ранжирования, структурированной валидности и времени ответа. Научная новизна исследования состоит в том, что выбор иммерсивного средства профессиональной подготовки рассматривается как задача семантического ранжирования альтернатив по цифровому профилю сотрудника.

Анализ сопутствующих исследований

Существующие обзорные работы связывают эффективность иммерсивного обучения с проектированием сценария, педагогической моделью и измеряемым образовательным результатом [1, 5]. Выбор тренажера должен учитывать не только

соответствие профессии, но и ограничения пользователя, уровень реалистичности, характер обратной связи и формируемых навыков [11, 12].

Эмпирические исследования показывают, что более высокая степень присутствия в immersive VR не всегда приводит к лучшему усвоению материала [13], что дополнительно обосновывает необходимость индивидуального выбора средства подготовки. VR/AR широко применяются в промышленной безопасности и охране труда [14], однако большинство решений остаются предметно специализированными, а задача выбора тренажера с учетом уровня подготовки, ошибок и текущей учебной задачи сотрудника проработана недостаточно [15].

Иммерсивные сценарии пожарной безопасности и эвакуации позволяют моделировать редкие и опасные события [16, 17], однако типовое назначение одного и того же тренажера не учитывает различия в опыте и ранее допущенных ошибках сотрудников.

Образовательные рекомендательные системы применяются для персонализации учебных ресурсов и траекторий [7]. Однако виртуальный тренажер как объект рекомендации сложнее традиционного учебного материала, поскольку дополнительно характеризуется аппаратной конфигурацией, уровнем иммерсивности, безопасностью, длительностью, сложностью, обратной связью и ограничениями пользователя.

Исследования искусственного интеллекта в образовании подчеркивают значение профилирования и адаптивной поддержки [18]. Для рассматриваемой задачи это означает необходимость связать цифровой профиль сотрудника с релевантным средством обучения. LLM расширяют возможности обработки слабоструктурированных образовательных данных и персонализации обучения [19]. Вместе с тем требуется контролировать корректность ответа, поскольку модель может нарушать структуру выдачи, возвращать недопустимые коды или игнорировать ограничения безопасности.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы. С одной стороны, существует развитое направление исследований по VR/AR-тренажерам и иммерсивному обучению, где изучаются проектирование сценариев, эффект присутствия, когнитивная нагрузка, мотивация, безопасность и учебные результаты; с другой – существует направление образовательных рекомендательных систем, где анализируются методы подбора ресурсов и курсов на основе профиля пользователя. Наконец, активно развивается применение LLM в образовательных и профессиональных сценариях. Однако на пересечении этих направлений остается недостаточно проработанной задача ранжирования иммерсивных тренажеров, программных и аппаратных средств профессиональной подготовки по цифровому профилю сотрудника.

Материалы и методы

Общая схема исследования

Методологическая схема исследования включает пять последовательных этапов. На первом этапе формируется набор цифровых профилей сотрудников, отражающий разные отраслевые и профессиональные ситуации. На втором этапе формируется каталог доступных средств подготовки. В него включаются виртуальные тренажеры и имитационные сценарии, отличающиеся тематикой, режимом реализации, длительностью, сложностью, целевыми компетенциями и ограничениями применения. На третьем этапе для каждого цифрового профиля формируется унифицированный запрос к большой языковой модели; на четвертом – выполняется вызов локальных LLM; на пятом – полученные рекомендации сопоставляются с экспертно заданным эталонным ранжированием.

Формальная постановка задачи ранжирования тренажеров

Пусть задано множество цифровых профилей сотрудников

$$U = \{u_1, u_2, ..., u_N\}, \quad (1)$$

где N – число анализируемых профилей. Каждый профиль сотрудника задается кортежем

$$u_i = (r_i, s_i, e_i, c_i, d_i, h_i, l_i), \quad (2)$$

где r_i – профессиональная роль; s_i – отрасль или производственный контекст; e_i – стаж и предшествующий опыт; c_i – результаты входной оценки компетенций; d_i – выявленные дефициты и потребности подготовки; h_i – история ранее пройденных тренажеров; l_i – ограничения использования иммерсивной среды и условия безопасности.

Множество доступных иммерсивных средств обозначим как

$$T = \{t_1, t_2, ..., t_M\}, \quad (3)$$

где M – число тренажеров в каталоге. Каждый тренажер описывается кортежем

$$t_j = (q_j, n_j, a_j, m_j, k_j, z_j, b_j), \quad (4)$$

где q_j – уникальный код; n_j – название; a_j – отрасль или область применения; m_j – режим реализации; k_j – формируемые компетенции; z_j – параметры сложности и длительности; b_j – ограничения и условия безопасного применения.

Для каждого профиля u_i требуется получить упорядоченный список

$$\pi_i = (q_{i,1}, q_{i,2}, ..., q_{i,K}), \ \ q_{i,K} \in T, \quad (5)$$

где $K = 5$, элементы списка не повторяются и расположены по убыванию ожидаемой релевантности. В отличие от задачи классификации, здесь требуется не только определить один целевой тренажер, но и сформировать верхний фрагмент индивидуальной траектории подготовки.

Экспертное эталонное ранжирование обозначим как

$$\pi_i^* = \left(q_{(i,1)}^*, q_{(i,2)}^*, ..., q_{(i,K)}^*\right), \quad (6)$$

где $q_{(i,K)}^*$ соответствует основному тренажеру, а последующие позиции задают допустимые дополнительные альтернативы. Эталон используется только для расчета метрик и не передается в контур формирования рекомендаций.

В общем виде соответствие между цифровым профилем сотрудника и тренажером может быть задано функцией релевантности

$$p : U \times T \to \mathbb{R}, \quad (7)$$

а корректное ранжирование должно удовлетворять условию

$$\rho(u_i, q_{i,1}) \geq \rho(u_i, q_{i,2}) \geq ... \geq \rho(u_i, q_{i,K}). \quad (8)$$

Метрики качества и эксплуатационной пригодности

Поскольку выходом алгоритма является ранжированный список, основными являются метрики верхней части выдачи. Accuracy@1 показывает долю профилей, для которых первый рекомендованный тренажер совпал с основным экспертным вариантом:

$$\text{Accuracy}@1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \mathbb{I}\left[q_{i,1} = q_{i,1}^{*}\right]. \tag{9}$$

Accuracy@3 отражает долю профилей, для которых основной экспертный тренажер попал в первые три рекомендации:

$$\text{Accuracy}@3 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \mathbb{I}\left[q_{i,1}^{*} \in \{q_{i,1}, q_{i,2}, q_{i,3}\}\right]. \tag{10}$$

Для оценки качества всего списка применяется NDCG@5. Если $\text{rel}_{i,k}$ – релевантность тренажера на позиции k для профиля u_i, то дисконтированный накопленный выигрыш определяется как

$$\text{DCG}@5_i = \sum_{k=1}^{5} \frac{\text{rel}_{i,k}}{\log_2(k+1)}. \tag{11}$$

Нормированное значение равно

$$\text{NDCG}@5_i = \frac{\text{DCG}@5_i}{\text{IDCG}@5_i}, \tag{12}$$

а среднее значение по выборке рассчитывается как

$$\text{NDCG}@5 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \text{NDCG}@5_i, \tag{13}$$

Дополнительно используется средний обратный ранг MRR@5

$$\text{MRR}@5 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\text{rank}_i}, \tag{14}$$

где rank_i – позиция первого появления основного экспертного тренажера в топ-5; если он отсутствует, вклад профиля принимается равным нулю.

Для прикладной системы важна не только содержательная точность, но и техническая пригодность ответа. Поэтому вводится структурированная валидность. Для профиля u_i она определяется как произведение трех условий: корректный JSON ($V_{\text{json},i}$), допустимые коды тренажеров ($V_{\text{codes},i}$) и правильная длина списка без повторов ($V_{\text{lenght},i}$)

$$V_i = V_{\text{json},i} \times V_{\text{codes},i} \times V_{\text{lenght},i}. \tag{15}$$

Агрегированная валидность равна

$$V = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} V_i. \tag{16}$$

Среднее время ответа модели оценивается как

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \tau_i, \tag{17}$$

где τ_i – время формирования рекомендации для профиля u_i.

Анализ базовой и гибридной реализации функций ранжирования

В базовой реализации LLM получает полный каталог тренажеров *T*, профиль сотрудника u_i и инструкцию вернуть пять рекомендаций в формате JSON. Запрос можно представить как

$$p_i = P(I, T, u_i, O), \tag{18}$$

где *I* – инструкция роли модели; *T* – каталог; u_i – профиль сотрудника; *O* – спецификация выходной структуры. Модель должна выбрать только существующие коды, упорядочить их по релевантности и для каждого элемента указать обоснование, адаптацию и замечания по безопасности.

Этот вариант реализации используется как исходная точка сравнения, поскольку показывает способность локальных LLM самостоятельно решать задачу семантического выбора.

Далее рассмотрим гибридный подход, объединяющий несколько компонентов, направленных на улучшение стабильности и качества работы LLM.

Первым компонентом гибридного подхода является детерминированный экспертно-признаковый скоринг. Его задача – оценить содержательную близость пары «сотрудник – тренажер» без обращения к экспертному эталону π_i^*. В обобщенном виде оценка задается как

$$S(u_i, t_j) = w_s S_s + w_n S_n + w_r S_r + w_x S_x - w_b B - w_c C - w_h H, \tag{19}$$

где S_s описывает совпадение отрасли; S_n – соответствие заявленным потребностям и дефицитам; S_r – связь должностной роли с назначением тренажера; S_x – текстово-семантическое пересечение профиля и описания тренажера; *B* – штраф за ограничения и противопоказания; *C* – штраф за несоответствие сложности уровню подготовки; *H* – штраф за повторное назначение уже успешно пройденного тренажера. Коэффициенты *w* задают относительную значимость компонентов и реализуются как экспертные эвристики.

На основе $S(u_i, t_j)$ для каждого профиля формируется лист возможных кандидатов

$$C_i = \mathrm{Top}_n \{S(u_i, t_i); t_i \in T\}, \quad n = 8. \tag{20}$$

Модель LLM в гибридном режиме получает не полный каталог, а только множество C_i. Это уменьшает число нерелевантных альтернатив, сокращает контекст, снижает вероятность галлюцинаций и предотвращает смещение к универсальным тренажерам, если профиль содержит явный специализированный риск.

Вторым компонентом является промт, в котором явно задается логика выбора: профильный риск и должностная задача имеют приоритет над общим отраслевым сходством; конкретный дефицит компетенций важнее универсального модуля; общий тренажер не должен вытеснять специализированный, если в профиле указан конкретный риск; ограничения VR и безопасности должны снижать приоритет неподходящих сценариев; успешно пройденный тренажер не должен повторно назначаться как основной.

После ответа модели применяется корректирующий контур (Repair). Пусть LLM вернула список

$$\hat{\pi}_i = \left(\hat{q}_{i,1}, \hat{q}_{i,2}, ..., \hat{q}_{i,L}\right). \tag{21}$$

Операция коррекции формирует корректный список

$$\tilde{\pi}_i = R\left(\hat{\pi}_i, T, S\right), \tag{22}$$

удаляя недопустимые коды, исключая повторы и дополняя недостающие позиции лучшими кандидатами по экспертно-признаковому скорингу.

Наиболее важным компонентом является гибридное ранжирование (Hybrid). Для каждого кода q рассчитывается нормированная экспертно-признаковая оценка $\widetilde{S}_i(q)$ и позиционная оценка LLM:

$$L_i(q) = \frac{K - r_i(q) + 1}{K}, \tag{23}$$

где $r_i(q)$ – позиция кода q в обработанного выдаче LLM. Итоговая гибридная оценка задается как

$$H_i(q) = \alpha \widetilde{S}_i(q) + (1 - \alpha)\, L_i(q), \quad \alpha = 70. \tag{24}$$

Набор кандидатов формируется как объединение обработанного выдачи LLM и верхней части экспертно-признакового ранжирования

$$P_i = \widetilde{\pi}_i \bigcup C_i. \tag{27}$$

Затем элементы P_i сортируются по $H_i(q)$, и выбираются первые пять кодов. Такая схема сохраняет способность LLM предложить контекстно релевантный вариант, но защищает итоговую рекомендацию от случайного выбора универсальных или невалидных тренажеров.

Схема проведения экспериментов

Исследование включает две экспериментальные серии. В первой серии все модели получают полный каталог тренажеров и формируют топ-5 список без дополнительной постобработки. Эта серия позволяет оценить прямой подход и выявить его ограничения.

Вторая серия исследует гибридную реализацию. Для всех моделей по тем же профилям и тому же каталогу сравниваются режимы RawLLM, Repair и Hybrid. RawLLM соответствует исходному ответу модели без исправления. Repair устраняет ошибки структуры, но сохраняет порядок LLM настолько, насколько это возможно. Hybrid объединяет очищенную выдачу LLM с экспертно-признаковым скорингом и заново упорядочивает пул кандидатов. Дополнительно рассчитывается Rule Baseline – детерминированный экспертно-признаковый подход без участия LLM. Он необходим для понимания того, какой вклад вносит формализованная предметная модель и насколько полезно добавление LLM к этой модели.

Результаты

Описание датасета

Экспериментальный набор включает 20 цифровых профилей сотрудников (табл. 1) и каталог из 20 виртуальных тренажеров (табл. 2). Каждый профиль содержит идентификатор, должностную роль, отрасль, стаж, результат входного тестирования, описание потребностей обучения, ограничения, предпочтения и экспертный топ-5 список рекомендуемых тренажеров. Каталог содержит код тренажера, название, категорию, отраслевую область, режим реализации, сложность, длительность, формируемые компетенции, целевую аудиторию, ограничения и показатели оценки результата.

Таблица 1

Фрагмент цифровых профилей сотрудников

ID	Профиль и исходные данные	Потребности и ограничения	Экспертный топ-5
U001	Новый монтажник строительной организации. Отрасль: строительство; тест: 42; стаж: 0,5 г.	Работа на высоте; СИЗ; эвакуация. Ограничения: низкий опыт; тревожность при высоте	VR-HEIGHT-002 > > VR-OT-001 > > VR-EVAC-005 > > VR-FIRSTAID-006 > > VR-FIRE-004
U002	Электромонтер ремонтной службы. Отрасль: энергетика; тест: 61; стаж: 3,0 г.	LOTO; электробезопасность; аварийные переключения. Ограничения: ошибки в чек-листе отключения	VR-ELECTRO-003 > > VR-ENERGY-014 > > VR-OT-001 > > VR-FIRSTAID-006 > > VR-FIRE-004
U003	Оператор погрузчика на распределительном складе. Отрасль: склад; тест: 55; стаж: 1,0 г.	Управление погрузчиком; движение среди пешеходов; эвакуация. Ограничения: киберболезнь средняя	VR-FORKLIFT-010 > > VR-OT-001 > > VR-EVAC-005 > > VR-FIRSTAID-006 > > VR-FIRE-004

Таблица 2

Фрагмент каталога виртуальных тренажеров

Код	Название	Компетенции и ограничения	Режим и параметры
VR-OT-001	Базовый инструктаж по охране труда и подбору СИЗ	Категория: охрана труда. Компетенции: выбор СИЗ, идентификация опасностей, безопасное поведение. Ограничения: нет	VR + интерактивные чек-листы 25 мин; сложность 0,25
VR-HEIGHT-002	Работа на высоте и применение страховочных систем	Категория: работа на высоте. Компетенции: осмотр привязи, выбор точки анкерования, порядок подъема. Ограничения: выраженная киберболезнь, паническая боязнь высоты без адаптационного режима	VR с контролем последовательности действий 35 мин; сложность 0,70
VR-FIRE-004	Пожарная безопасность и применение первичных средств тушения	Категория: пожарная безопасность. Компетенции: выбор огнетушителя, оценка класса пожара, безопасная дистанция. Ограничения: тяжелая киберболезнь при дымовых эффектах	VR с моделированием очага возгорания 30 мин; сложность 0,45

Сравниваемые модели

В эксперименте участвовали десять локальных LLM в формате GGUF (табл. 3). Все модели использовались в режиме inference-only, без дообучения на профилях сотрудников и без подстройки под конкретный каталог тренажеров. Такой режим позволяет оценить исходную способность моделей выполнять семантическое ранжирование по единому протоколу запроса.

Таблица 3

Локальные LLM, включенные в эксперимент

Обозначение	Базовая конфигурация	Квантование
DeepSeek-7B-Q4	DeepSeek-R1-Distill-Qwen 7B	Q4_K_M
Qwen3.6-35B-Q4	Qwen3.6-35B-A3B	Q4_K_S
LFM2-24B-Q4	LFM2-24B-A2B	Q4_K_M
Qwen3.5-9B-Q8	Qwen3.5-9B	Q8_0
Qwen3.5-9B-Q4	Qwen3.5-9B	Q4_K_M
Gemma-4B-Q8	gemma-4-E4B-it	Q8_0
GPT-OSS-20B	gpt-oss-20b	MXFP4
Ministral-14B-Q4	Ministral-3-14B-Reasoning	Q4_K_M
Nemotron-4B-Q8	NVIDIA-Nemotron-3-Nano	Q8_0
Qwen3.6-27B-IQ3	Qwen3.6-27B	IQ3_XXS

Результаты прямого LLM-ранжирования

В первой серии каждая модель получила полный каталог тренажеров и цифровые профили сотрудников. Результатом являлся топ-5 список тренажеров, возвращенный моделью. Сводные результаты приведены в табл. 4.

Полученные результаты показывают, что прямой LLM-подход решает задачу недостаточно устойчиво. Лучшая модель по NDCG@5 действительно выделяется на фоне остальных, однако абсолютный уровень качества остается ограниченным: даже у лидера первая рекомендация совпадает с экспертным основным тренажером менее чем в половине профилей. При этом Accuracy@3 заметно выше, но полученные результаты по-прежнему остаются неудовлетворительными.

Таблица 4

Результаты прямого LLM-ранжирования по полному каталогу

Модель	Acc@1	Acc@3	NDCG@5	MRR@5	Валидн.	Время, с
DeepSeek-7B-Q4	0,4500	0,7000	0,4627	0,5792	0,5500	13,93
Qwen3.6-35B-Q4	0,4000	0,5000	0,4165	0,4667	0,5000	15,47
LFM2-24B-Q4	0,3500	0,5500	0,3924	0,4625	0,6500	14,76
Qwen3.5-9B-Q8	0,4500	0,6000	0,3900	0,5167	0,4500	14,34
Qwen3.5-9B-Q4	0,4000	0,5500	0,3797	0,4583	0,5000	14,47
Gemma-4B-Q8	0,3000	0,5500	0,3725	0,4183	0,7500	13,42
GPT-OSS-20B	0,3500	0,5500	0,3688	0,4625	0,4500	13,74
Ministral-14B-Q4	0,3500	0,5000	0,3685	0,4500	0,5000	15,45
Nemotron-4B-Q8	0,3000	0,4500	0,3419	0,3892	0,4500	16,23
Qwen3.6-27B-IQ3	0,2500	0,4500	0,3272	0,3625	0,4500	15,20

Основная причина низкого результата связана не только с качеством отдельных LLM, но и с тем, что в полном каталоге присутствуют универсальные тренажеры – охрана труда, пожарная безопасность, эвакуация и т.д. – которые подходят многим профилям. При отсутствии жесткой рубрики модель нередко выбирает такой универсальный сценарий вместо специализированного. Кроме того, тренажеры имеют пересекающиеся компетенции: эвакуация связана с пожаром, первая помощь – с травмами и авариями, электробезопасность – с энергетикой и производственным обслуживанием.

Отдельным ограничением стала структурированная валидность. Даже когда ответ модели является синтаксически корректным JSON, он может содержать повторяющиеся коды, несуществующие обозначения или список неправильной длины. Поэтому прямое LLM-ранжирование не может использоваться как автономный механизм назначения тренажера. Оно требует программного контроля и экспертной проверки.

Сравнение методологических режимов

Во второй серии оценивались режимы RawLLM, Repair, Hybrid и Rule Baseline. Сравнение этих режимов позволяет отделить вклад языковой модели от вклада методологической обвязки. Результаты приведены в табл. 5.

Переход от исходных ответов LLM к Repair устраняет технические ошибки и повышает структурированную валидность до единицы. При этом рост качества ранжирования оказывается умеренным: Repair в основном исправляет непригодность формата, но не решает проблему слабого порядка рекомендаций. Это подтверждает, что одних технических проверок недостаточно. Если модель поставила универсальный тренажер выше специализированного, простое удаление повторов не исправит содержательную ошибку.

Наиболее существенный эффект дает гибридное ранжирование (Hybrid). Среднее значение NDCG@5 почти удваивается относительно прямого raw-подхода, а Accuracy@1 и Accuracy@3 также резко возрастают.

Rule Baseline показал высокий результат. Формализованная предметная модель, учитывающая отрасль, дефициты, роль, ограничения и историю подготовки, сама по себе дает большой объем информации для обработки, поэтому LLM не должна заменять экспертную логику. Более корректная архитектура состоит в их объединении: экспертно-признаковый модуль обеспечивает безопасность и базовую релевантность, а LLM интерпретирует слабоструктурированный контекст и может уточнять или объяснять выбор.

Гибридные результаты по всем моделям

Результаты Hybrid-режима по всем моделям приведены в табл. 6. В этом режиме итоговый топ-5 формируется не как прямой ответ LLM, а как результат объединения обработанной выдачи модели и экспертно-признакового ранжирования.

Таблица 5

Сравнение методологических режимов обработки результатов (в среднем по моделям)

Режим	Acc@1	Acc@3	NDCG@5	Валидность	Лучший NDCG
Raw LLM	0,3600	0,5400	0,3820	0,5250	0,4627
Repair	0,4100	0,6200	0,5013	1,0000	0,5563
Hybrid	0,6800	0,8700	0,7387	1,0000	0,7562
Rule Baseline	0,7000	0,8500	0,7726	1,0000	0,7726

Таблица 6

Результаты гибридной реализации на различных моделях

Модель	Acc@1	Acc@3	NDCG@5	MRR@5	Время, с
Rule Baseline	0,7000	0,8500	0,7726	0,7792	0,00
DeepSeek-7B-Q4	0,7000	0,9000	0,7562	0,8125	13,93
Qwen3.6-35B-Q4	0,6000	0,9000	0,7520	0,7625	15,47
Qwen3.5-9B-Q8	0,7500	0,8500	0,7444	0,8125	14,34
Qwen3.5-9B-Q4	0,6500	0,8500	0,7407	0,7625	14,47
Ministral-14B-Q4	0,7000	0,9000	0,7372	0,7917	15,45
Nemotron-4B-Q8	0,6500	0,8500	0,7366	0,7500	16,23
Gemma-4B-Q8	0,7500	0,8500	0,7355	0,7917	13,42
LFM2-24B-Q4	0,6500	0,9000	0,7349	0,7792	14,76
Qwen3.6-27B-IQ3	0,6500	0,8500	0,7273	0,7625	15,20
GPT-OSS-20B	0,7000	0,8500	0,7219	0,7850	13,74

В отличие от первой серии, качество всех моделей значительно улучшилось. Наиболее важный практический эффект состоит в том, что структурированная валидность Hybrid-режима становится полной. Следовательно, гибридный подход решает не только задачу повышения точности, но и задачу надежности вывода.

Обсуждение

Сопоставление двух экспериментальных серий показывает, что слабый результат прямого LLM-подхода показывает, что задача выбора иммерсивного тренажера является слишком многокритериальной для полностью автономного ранжирования по полному каталогу. Он хорошо извлекает смысловые связи, но плохо гарантирует строгий формат, устойчивый порядок и соблюдение всех ограничений.

Гибридный подход показывает намного более перспективные результаты за счет указания приоритетов выбора и снижения неоднозначности интерпретации, перевода ответа в машинно-обрабатываемую форму и объединения позиции LLM с экспертно-признаковой оценкой.

Полученный эффект важен тем, что в ходе сравнения выявлен наибольший эффект не просто от замены одной LLM на другую, а путем изменения архитектуры решения. Это означает, что при проектировании СППР нельзя ограничиваться сравнением моделей как «черных ящиков», необходимо задавать структуру предметной области, формализовать допустимые альтернативы, контролировать формат ответа и отделять содержательную релевантность от технической валидности.

Одновременно результаты показывают, что Rule Baseline остается сильным ориентиром. Если детерминированная экспертная модель сопоставима с отдельными LLM, то они должны использоваться не как замена экспертного правила, а как контекстный компонент, способный работать со слабоструктурированными описаниями, формировать объяснения и дополнять строгое ранжирование там, где признаки профиля не сводятся к простым ключевым словам.

Заключение

В работе исследована задача выбора виртуальных тренажеров и иммерсивных средств профессиональной подготовки по цифровому профилю сотрудника. Выбор тренажера формализован как задача ранжирования ограниченного множества альтернатив, где объектами обработки являются слабоструктурированный профиль сотрудника, каталог тренажеров и экспертное эталонное ранжирование. В качестве интеллектуального компонента рассмотрены локальные большие языковые модели, развертываемые без передачи данных во внешние облачные сервисы.

Первая экспериментальная серия показала, что прямое применение LLM к полному каталогу тренажеров дает ограниченное качество. Модели способны находить тематически близкие сценарии, но часто ошибаются в первом выборе, смещаются к универсальным модулям и нарушают формальные требования к структуре ответа. Поэтому прямой LLM-подход не может рассматриваться как готовое решение для автономного назначения тренажеров.

Для устранения выявленных ограничений предложен гибридный подход. Экспериментальное сравнение показало, что такой подход существенно повышает качество рекомендаций и обеспечивает полную структурированную валидность итогового списка. Основной прирост связан не с изменением локальной модели, а с методологической организацией процесса выбора.

Научный результат работы состоит в формализации применения LLM как контролируемого ранжирующего компонента СППР, предложении воспроизводимого программного контура, который может быть использован при разработке систем организации профессиональной подготовки на базе иммерсивных технологий.

Ограничения исследования связаны с размером датасета и характером цифровых профилей. Полученные результаты следует рассматривать как методологическое обоснование и экспериментальную проверку подхода. Дальнейшее развитие работы состоит в расширении выборки, привлечении нескольких независимых экспертов к разметке релевантности, оценке качества объяснений LLM, учете результатов прохождения тренажеров и проверке гибридной схемы в составе действующей платформы иммерсивного обучения.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что локальные LLM могут быть полезны для организации профессиональной подготовки на базе иммерсивных систем, но наибольший практический эффект достигается при их включении в гибридную архитектуру, где формализованные правила обеспечивают надежность, а языковая модель – интерпретацию слабоструктурированного контекста и поддержку экспертного выбора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» (124102100628-3).

Список литературы

1. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda / J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, I. Wohlgenannt // Computers & Education. – 2020. – Vol. 147. – Art. 103778. doi: 10.1016/j.compedu.2019.103778

2. Системный анализ и формализация структуры адаптивных тренажерных комплексов эргатических систем / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 4(178). – С. 45–52. doi: 10.14489/vkit.2019.04.pp.045-052

3. Virtual Reality for Safety Training: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis / D. Scorgie, Z. Feng, D. Paes [et al.] // Safety Science. – 2023. – Vol. 171. – Art. 106372. doi:10.1016/j.ssci.2023.106372

4. Visualization Technology and Tool Selection Methods for Solving Adaptive Training Complex Structural-Parametric Synthesis Problems / M. N. Krasnyanskiy, D. L. Dedov, A. D. Obukhov, S. Yu. Alekseev // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2020. – Vol. 20, No. 4. – P. 1–13. doi: 10.1115/1.4045289

5. Jensen, L. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training / L. Jensen, F. Konradsen // Education and Information Technologies. – 2018. – Vol. 23, No. 11. – P. 1515–1529. doi: 10.1007/s10639-017-9676-0

6. Система управления адаптивной беговой платформой на основе технологий компьютерного зрения / А. Д. Обухов, К. И. Патутин, Е. О. Суркова, А. Е. Архипов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 363–374. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.363-374

7. Urdaneta-Ponte, M. C. Recommendation Systems for Education: Systematic Review / M. C. Urdaneta-Ponte, A. Mendez-Zorrilla, I. Oleagordia-Ruiz // Electronics. – 2021. – Vol. 10, No. 14. – Art. 1611. doi: 10.3390/electronics10141611

8. Краснянский, М. Н. Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием / М. Н. Краснянский, А. И. Попов, А. Д. Обухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 196–208. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208

9. Gao, Y. The effectiveness of traditional tools and computer-aided technologies for health and safety training in the construction sector: A systematic review / Y. Gao, V. Gonzalez, K. T. W. Yiu // Computers & Education. – 2019. – Vol. 138. – P. 101–115. doi: 10.1016/j.compedu.2019.05.003

10. Попов, А. И. Концептуальные подходы к формированию и оцениванию компетенций будущих специалистов в экстремальной деятельности / А. И. Попов, С. В. Карпушкин, А. Д. Обухов // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2020. – № 1(37). – С. 51–59.

11. Pellas, N. Immersive Virtual Reality in K-12 and Higher Education: A systematic review of the last decade scientific literature / N. Pellas, S. Mystakidis, I. Kazanidis // Virtual Reality. – 2021. – Vol. 25, No. 6. – P. 835–861. doi: 10.1007/s10055-020-00489-9

12. Makransky, G. The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality / G. Makransky, G. B. Petersen // Educational Psychology Review. – 2021. – Vol. 33, No. 3. – P. 937–958. doi: 10.1007/s10648-020-09586-2

13. Makransky, G. Adding Immersive Virtual Reality to a Science Lab Simulation Causes More Presence But Less Learning / G. Makransky, T. S. Terkildsen, R. E. Mayer // Learning and Instruction. – 2017. – Vol. 60. – P. 225–236. doi: 10.1016/j.learninstruc.2017.12.007

14. A Critical Review of Virtual and Augmented Reality (VR/AR) Applications in Construction Safety / X. Li, W. Yi, H.-L. Chi, [et al.] // Automation in Construction. – 2017. – Vol. 86. – P. 150–162. doi: 10.1016/j.autcon.2017.11.003

15. Информационная система управления профессиональным становлением студента в процессе самостоятельной работы / М. Н. Краснянский, А. И. Попов, А. Д. Обухов, С. В. Карпушкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки. – 2019. – № 1(41). – С. 75–92. doi: 10.17673/vsgtu-pps.2019.1.6

16. Lampropoulos, G. Virtual Reality and Gamification in Education: A Systematic Review / G. Lampropoulos, Kinshuk // Educational Technology Research and Development. – 2024. – Vol. 72, No. 3. – P. 1691–1785. doi: 10.1007/s11423-024-10351-3

17. Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality in Experiential Learning: Transforming Educational Paradigms / H. Crogman, V. D. Cano, E. Pacheco, R. B. Sonawane, R. Boroon// Education Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 3. – Art. 303. doi: 10.3390/educsci15030303

18. Obukhov, A. Algorithm of Adaptation of Electronic Document Management System Based on Machine Learning Technology / A. Obukhov, M. Krasnyanskiy, M. Nikolyukin // Progress in Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 9, No. 4. – P. 287–303. doi: 10.1007/s13748-020-00214-2

19. Резаев, А. В. ChatGPT и искусственный интеллект в университетах: какое будущее нам ожидать? / А. В. Резаев, Н. Д. Трегубова // Высшее образование в России. – 2023. – Т. 32, № 6. – С. 19–37. doi: 10.31992/0869-3617-2023-32-6-19-37

Application of Large Language Models for Organizing Professional Training Based on Immersive Systems

© A. Yu. Sveshnikov[1] ✉, Yu. V. Nikitnikov[1], M. A. Shiltsyn[1], D. L. Dedov[2]

[1] *Department of Automated Decision Support Systems, hammer68@mail.ru; TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[2] *Department of Fundamental and Applied Research, TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: large language models; virtual training simulators; immersive systems; professional training; alternative ranking; recommendation systems; decision support system; employee digital profile.

Abstract: The paper examines the potential of using local large language models (LLMs) to rank virtual training simulators and immersive professional training tools based on an employee's digital profile. A semantic ranking task is formulated, utilizing LLMs to analyze semi-structured user data and match it against a catalog of available training solutions. An experimental evaluation was conducted using a dataset of 20 employee digital profiles from various industries and a catalog of virtual simulators covering diverse areas (occupational health and safety, electrical safety, fire safety, evacuation procedures, first aid, etc.). Ten local LLMs were compared. Recommendation quality was assessed using various accuracy metrics; additionally, the analysis covered the structured validity of responses, the correctness of returned simulator codes, and average execution time. A conclusion is drawn regarding the applicability of local LLMs as an intelligent component of a decision support system for selecting immersive professional training tools.

References

1. Radianti J., Majchrzak T.A., Fromm J., Wohlgenannt I. A Systematic Review of Immersive Virtual Reality Applications for Higher Education: Design Elements, Lessons Learned, and Research Agenda, *Computers & Education*, 2020, vol. 147, art. 103778. doi: 10.1016/j.compedu.2019.103778

2. Krasnyanskiy M.N., Dedov D.L., Obukhov A.D., Alekseev S.Yu. [System Analysis and Formalization of the Structure of Adaptive Training Complexes of Ergatic Systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], 2019, no. 4(178), pp. 45-52. doi: 10.14489/vkit.2019.04.pp.045-052 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Scorgie D., Feng Z., Paes D. [et al.] Virtual Reality for Safety Training: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis, *Safety Science*, 2023, vol. 171, art. 106372. doi:10.1016/j.ssci.2023.106372

4. Krasnyanskiy M.N., Dedov D.L., Obukhov A.D., Alekseev S.Yu. Visualization Technology and Tool Selection Methods for Solving Adaptive Training Complex Structural-Parametric Synthesis Problems, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 1-13. doi: 10.1115/1.4045289

5. Jensen L., Konradsen F. A Review of the Use of Virtual Reality Head-Mounted Displays in Education and Training, *Education and Information Technologies*, 2018, vol. 23, no. 11, pp. 1515-1529. doi: 10.1007/s10639-017-9676-0

6. Obukhov A.D., Patutin K.I., Surkova Ye.O., Arkhipov A.Ye. [Control System of an Adaptive Running Platform Based on Computer Vision Technologies], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 363-374. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.363-374 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Urdaneta-Ponte M.C., Mendez-Zorrilla A., Oleagordia-Ruiz I. Recommendation Systems for Education: Systematic Review, *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 14, art. 1611. doi: 10.3390/electronics10141611

8. Krasnyanskiy M.N., Popov A.I., Obukhov A.D. [Mathematical Modeling of an Adaptive Professional Education Management System], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 196-208 doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Gao Y., Gonzalez V., Yiu K.T.W. The Effectiveness of Traditional Tools and Computer-Aided Technologies for Health and Safety Training in the Construction Sector: A Systematic Review, *Computers & Education*, 2019, vol. 138, pp. 101-115. doi: 10.1016/j.compedu.2019.05.003

10. Popov A.I., Karpushkin S.V., Obukhov A.D. [Conceptual Approaches to the Formation and Assessment of Competencies of Future Specialists in Extreme Activities], *Professional'noye obrazovaniye v Rossii i za rubezhom.* [Professional Education in Russia and Abroad], 2020, no. 1(37), pp. 51-59. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Pellas N., Mystakidis S., Kazanidis I. Immersive Virtual Reality in K-12 and Higher Education: A systematic review of the last decade scientific literature, *Virtual Reality*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 835-861. doi: 10.1007/s10055-020-00489-9

12. Makransky G., Petersen G.B. The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality, *Educational Psychology Review*, 2021, vol. 33, no. 3, pp. 937-958. doi: 10.1007/s10648-020-09586-2

13. Makransky G., Terkildsen T.S., Mayer R.E. Adding Immersive Virtual Reality to a Science Lab Simulation Causes More Presence But Less Learning, *Learning and Instruction*, 2017, vol. 60, pp. 225-236. doi: 10.1016/j.learninstruc.2017.12.007

14. Li X., Yi W., Chi H.-L. [et al.] A Critical Review of Virtual and Augmented Reality (VR/AR) Applications in Construction Safety, *Automation in Construction*, 2017, vol. 86, pp. 150-162. doi: 10.1016/j.autcon.2017.11.003

15. Krasnyanskiy M.N., Popov A.I., Obukhov A.D., Karpushkin S.V. [Information system for managing the professional development of a student in the process of independent work], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.*

Seriya: Psikhologo-pedagogicheskiye nauki [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Psychological and Pedagogical Sciences], 2019, no. 1(41), pp. 75-92. doi: 10.17673/vsgtu-pps.2019.1.6 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Lampropoulos G., Kinshuk. Virtual Reality and Gamification in Education: A Systematic Review, *Educational Technology Research and Development*, 2024, vol. 72, no. 3, pp. 1691-1785. doi: 10.1007/s11423-024-10351-3

17. Crogman H., Cano V.D., Pacheco E., Sonawane R.B., Boroon R. Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality in Experiential Learning: Transforming Educational Paradigms, *Education Sciences*, 2025, vol. 15, no. 3, art. 303. doi: 10.3390/educsci15030303

18. Obukhov A., Krasnyanskiy M., Nikolyukin M. Algorithm of Adaptation of Electronic Document Management System Based on Machine Learning Technology, *Progress in Artificial Intelligence*, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 287-303. doi: 10.1007/s13748-020-00214-2

19. Rezaev A.V., Tregubova N.D. ChatGPT and artificial intelligence in universities: what future should we expect?, *Vyssheye obrazovaniye v Rossii* [Higher Education in Russia], 2023, vol. 32, no. 6, pp. 19-37. doi: 10.31992/0869-3617-2023-32-6-19-37 (In Russ., abstract in Eng.)

Anwendung großer Sprachmodelle zur Organisation professioneller Schulungen auf Basis immersiver Systeme

Zusammenfassung: Der Artikel untersucht die Möglichkeit, lokale große Sprachmodelle (LLM) zur Bewertung virtueller Simulatoren und immersiver beruflicher Schulungstools auf Basis des digitalen Profils von Mitarbeitern einzusetzen. Das Ziel ist die semantische Bewertung mittels LLM auf Grundlage der Analyse semistrukturierter Nutzerdaten und deren Vergleich mit einem Katalog verfügbarer Simulatorlösungen. Die experimentelle Evaluierung ist mit 20 digitalen Profilen von Mitarbeitern verschiedener Branchen und einem Katalog virtueller Simulatoren aus unterschiedlichen Bereichen (Arbeitssicherheit, elektrische Sicherheit, Brandschutz, Evakuierung, erste Hilfe usw.) durchgeführt. Zehn lokale LLM wurden im Vergleich verwendet. Die Qualität der Empfehlungen wurde anhand verschiedener Genauigkeitsmetriken bewertet. Zusätzlich wurden die strukturierte Validität der Antwort, die Korrektheit der zurückgegebenen Simulatorcodes und die durchschnittliche Ausführungszeit analysiert. Abschließend ist die Anwendbarkeit lokaler LLM als intelligente Komponente des Systems zur Unterstützung der Auswahl immersiver beruflicher Schulungstools bewertet.

Application des grands modèles linguistiques pour la formation sur les systèmes immersifs

Résumé: Est envisagée la possibilité d'utiliser les grands modèles linguistiques locaux (MLL) pour classer les simulateurs virtuels et les outils de la formation immersive sur le profil numérique du collaborateur. La tâche de classement sémantique à l'aide de MLL est basée sur l'analyse des informations sur l'utilisateur et leur comparaison avec un catalogue des solutions de la simulation disponibles. L'évaluation pilote est réalisée sur un ensemble de 20 profils numériques d'employés de différents

secteurs et un catalogue des simulateurs virtuels couvrant de différents domaines (santé au travail, sécurité électrique, sécurité incendie, évacuation, premiers secours, etc.). Dix MLL locaux ont participé à la comparaison. La qualité des recommandations est évaluée selon diverses métriques d'exactitude, et l'on a également analysé la validité structurée des réponses, la correctitude des codes de simulateurs retournés ainsi que le temps moyen d'exécution. Est faite une conclusion sur l'applicabilité des MLL locales en tant que composant intellectuel d'un système de soutien de choix pour les moyens d'apprentissage professionnel immersif.

Авторы: ***Свешников Артем Юрьевич*** – старший преподаватель кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ***Никитников Юрий Витальевич*** – ассистент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; ***Шильцын Максим Александрович*** – ассистент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; ***Дедов Денис Леонидович*** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 620.179.143.5
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.390-397

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ФЕРРОЗОНДОВ

© В. Д. Шаповалов[1], В. П. Кучер[1] ✉, В. С. Безкоровайный[2]

[1] *Кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии», vkucher86@mail.ru;*
[2] *кафедра «Электромеханика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Российская Федерация*

Ключевые слова: обработка сигнала; феррозонд; фильтр Баттерворта; фильтр Чебышева; цифровой сигнал; цифровой фильтр; эллиптический фильтр.

Аннотация: Представлены методы цифровой обработки сигналов феррозондовых датчиков. Рассмотрены причины искажений выходного сигнала шумами и помехами, влияние соотношения амплитуды сигнала и входного диапазона аналого-цифрового преобразователя на качество оцифровки. Дано сравнение эффективности цифровых фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического в среде моделирования SciLab. Показано повышение точности и надежности измерений благодаря снижению уровня шумов и улучшению качества оцифрованного сигнала.

Введение

Феррозонды – это магниточувствительные преобразователи, применяемые для регистрации широкого круга различных физико-технических параметров: магнитного поля и остаточной намагниченности, положения и перемещения в концевых датчиках, а также для считывания магнитных меток при определении расстояния, скорости и других параметров [1]. Благодаря своей простоте и высокой чувствительности феррозонды находят широкое применение в промышленной автоматике, датчиках положения, измерительных системах и устройствах идентификации. Одним из наиболее перспективных направлений является магнитная диагностика с применением феррозондовых датчиков.

Принцип действия феррозондовых датчиков. Феррозонд представляет собой чувствительный элемент, реагирующий на изменение магнитного потока в магнитопроводе.

Выходной сигнал феррозонда имеет однополярную форму, что обеспечивает устойчивость к электромагнитным помехам и повышает точность диагностики.

Эффективность работы феррозонда характеризуется коэффициентом эффективности, определяемым выражением

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max} + \Phi_{min}}, \quad (1)$$

где Φ_{max} и Φ_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения магнитного потока в магнитопроводе датчика [2].

Информативной частью выходного сигнала феррозонда в большинстве практических задач являются амплитуда сигнала или моменты фронтов импульса. Это предъявляет повышенные требования к форме сигнала и уровню помех. Искажения и шумы существенно ухудшают точность определения момента срабатывания, измеряемой величины и надежность распознавания меток. На реальные сигналы феррозонда часто накладываются как широкополосные шумы вне импульса, так и помехи внутри самого импульса, что приводит к дополнительным погрешностям при измерениях и неверной интерпретации результатов при последующей оцифровке.

Процесс преобразования аналогового сигнала феррозонда в цифровую форму чувствителен к соотношению уровня сигнала и входного диапазона аналого-цифрового преобразователя (**АЦП**). Низкая амплитуда входного сигнала приводит к тому, что значимая часть разрешения АЦП не используется, вследствие чего младшие разряды становятся неустойчивыми и вносят значительную дисперсию в результаты измерений. Усиление входного сигнала до допустимого диапазона АЦП позволяет снизить влияние нестабильности младших разрядов, однако периодические и синхронные помехи могут сохраняться и продолжать ухудшать точность [3].

Анализ оцифрованных сигналов феррозонда показывает наличие периодических составляющих помех, что открывает путь к их подавлению с использованием цифровой обработки сигналов. Применение цифровых фильтров и методов адаптивной фильтрации позволяет улучшить форму выходного сигнала, снизить уровень шумов и, как следствие, повысить точность и надежность измерений. В работе рассматриваются вопросы, связанные с формированием и улучшением управляющих сигналов и уменьшением влияния шумов на результаты оцифровки и обработку данных.

Натурный эксперимент

Феррозонды применяются для измерения различных параметров, в частности, магнитного поля, остаточной намагниченности, чувствительных элементов в концевых датчиках перемещения, для считывания магнитных меток при определении расстояния, скорости и т.п. В большинстве случаев информативной частью являются амплитуда или фронты сигнала, что предъявляет высокие требования к форме и зашумленности выходного сигнала феррозонда. Реальный сигнал феррозонда представлен на рис. 1.

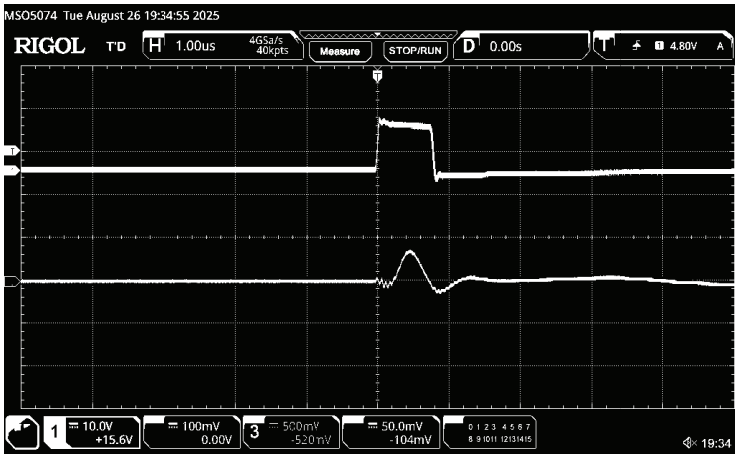


Рис. 1. Осциллограмма управляющего импульса (вверху) и выходного сигнала (внизу) феррозонда

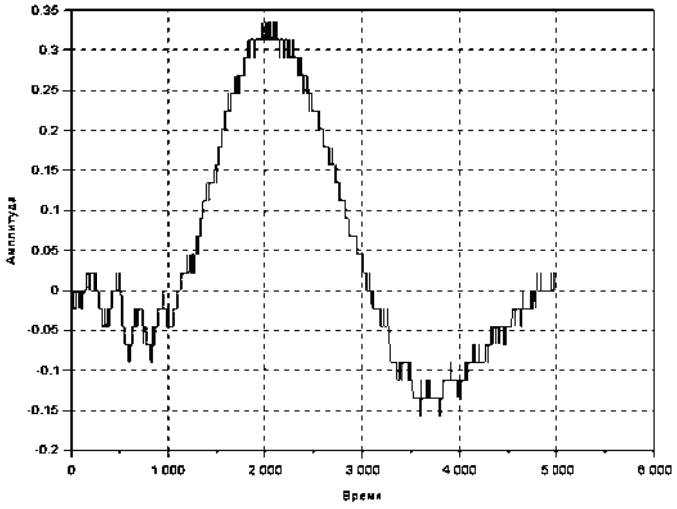


Рис. 2. График оцифрованного выходного импульса феррозонда

По виду выходного сигнала можно отметить наличие шумов, как вне импульса, так и в самом импульсе, что будет приводить к погрешностям при измерениях. При оцифровке выходного сигнала шумы будут приводить к погрешностям оцифровки, что наглядно видно на рис. 2.

На приведенном графике четко видно влияние шумов на работу аналого-цифрового преобразователя, в частности, неустойчивое преобразование младшего разряда, что приводит к резкому повышению погрешности измерений. Вместе с тем следует отметить, что в данном случае имеет место быть некорректное применение АЦП, а именно, на него подан сигнал с малой амплитудой, что привело к использованию части разрядов преобразователя и появлению неустойчивой работы младшего разряда.

Для устранения этого эффекта входной сигнал усилен до допустимого входного значения АЦП, усиленный и оцифрованный выходной импульс представлен на рис. 3.

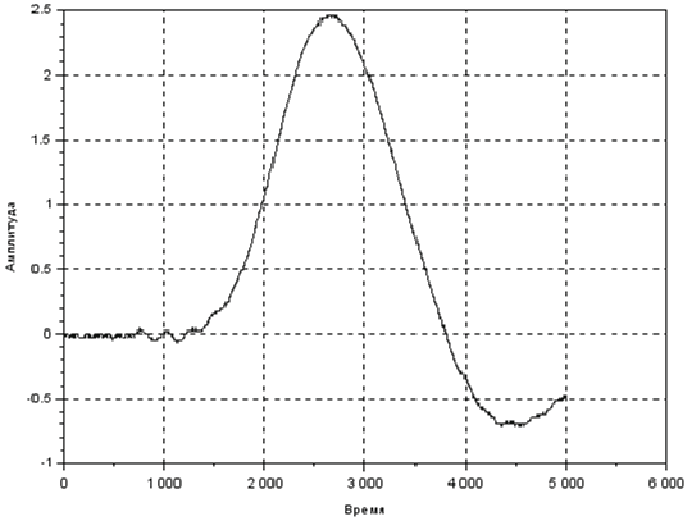


Рис. 3. Выходной усиленный оцифрованный импульс феррозонда

После усиления и оцифровки заметно снижено влияние неустойчивой работы младшего разряда АЦП, однако эта помеха присутствует, что будет приводить к погрешностям при измерениях.

Анализируя оцифрованные сигналы феррозонда (рис. 2 и 3), можно сделать следующий вывод: помехи носят периодический характер, что позволяет предположить применение цифрового фильтра для снижения помех.

Для проверки предложенного подхода использования цифровых фильтров выполнено моделирования процесса фильтрации с использование среды моделирования SciLab 6.02. Scilab – это система компьютерной математики, которая предназначена для выполнения инженерных и научных вычислений [4], где реализовано моделирование цифровых фильтров, в частности фильтров Баттерворта, Чебышева1, Чебышева 2, эллиптического (Кауэра–Золоторева). Для этого в SciLab включена функция цифрового фильтра

hz] = iir(n,'lp','butt',[Fc/Fd],[delta 1, delta 2]);

где n – порядок фильтра; lp – фильтр низкой частоты; butt – фильтр Баттерворта; Fc/Fd – отношение частоты среза фильтра к частоте дискретизации; delta 1, delta 2 – параметры пульсаций в полосе пропускания и полосе задержки, для фильтра Баттерворта = 0.

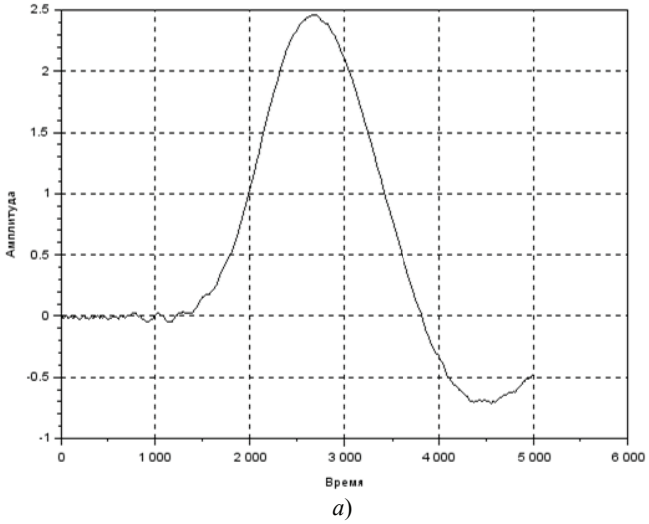
В среде моделирования SciLab разработана программа моделирования, которая считывает числовой массив данных выходного сигнала феррозонда, представляет его в виде графика, строит спектр сигнала, на основании которого выбирается частота среза, выполняет фильтрацию и выводит график отфильтрованного сигнала. Получены графики отфильтрованного сигнала для фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического.

Программа моделирования:

```
clear()
clc()
// открываем поток Excel
[fd,SST,Sheetnames,Sheetpos]=
xls_open('C:\Users\user\Documents\filtryscilab\impuls3.xls');
// Читаем файл данных
[Oscilogr,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1));
// Закрываем поток электронной таблицы
mclose(fd);
Ex_imp = Oscilogr(2000:7000,3);//читаем со 2000 строки по 7000 столбец 3 листа 1

scf(1)
//построить график входного импульса
plot(Ex_imp)
xgrid()
xlabel("Время")
ylabel("Амплитуда")
xtitle("Выходной усиленный оцифрованный импульс")

// построение спектра входного сигнала
Fd = 400; // Частота дискретизации, Гц
t=1:20;//
n = length(t);
f = linspace(0,Fd,n); // вектор частот
X = fft(Ex_imp)./(length(Ex_imp)/2); // спектр сигнала
```

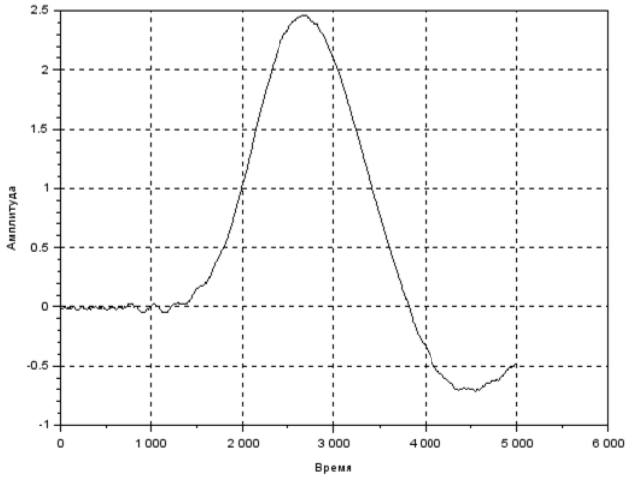
```
scf(2)
plot(f(1:n/2),abs(X(1:n/2))); // вывод графика спектра сигнала, п/к определяет ось х
xgrid()
xtitle("Спектр сигнала Ex_imp","Частота","амплитуда");

//Фильтрация сигнала
Fd = 400; // Частота дискретизации, Гц
Fc = 10;  // Частота среза, Гц
n = 3;     // Порядок фильтра
[hz] = iir(n,'lp','butt',[Fc/Fd],[0, 0]) //функция фильтра
disp (hz);//печать передаточной функции фильтра
Ex_imp1=matrix(Ex_imp,1,5001)//конвертирование матрицы столбец в матрицу строку
y=flts(Ex_imp1,hz); //фильтрация
scf(3)//создание нового окна
plot(y)
xgrid()
xtitle("Выходной отфильтрованный   сигнал","Время","Амплитуда");

// построение спектра отфильтрованного сигнала
Fd = 400; // Частота дискретизации, Гц
t=1:40;//
n = length(t);
f = linspace(0,Fd,n); // вектор частот
X = fft(y)./(length(y)/2); // спектр сигнала
scf(4)
plot(f(1:n/2),abs(X(1:n/2))); // вывод графика спектра сигнала, п/к определяет ось х
xgrid()
xtitle("Спектр сигнала после фильтра","Частота","амплитуда");
```

В результате моделирования работы фильтров получены графики, показанные на рис. 4.

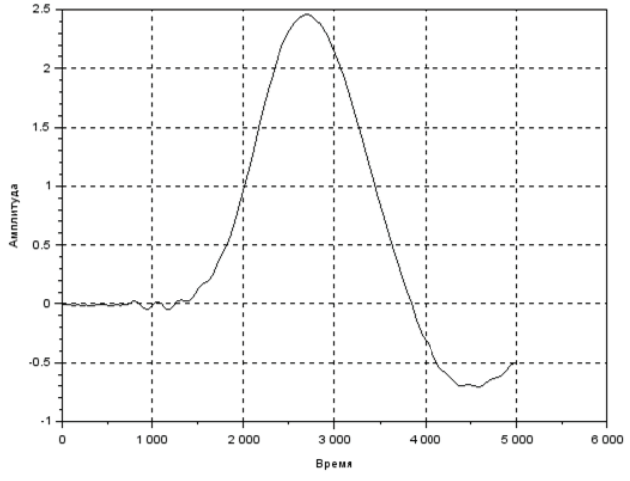


а)

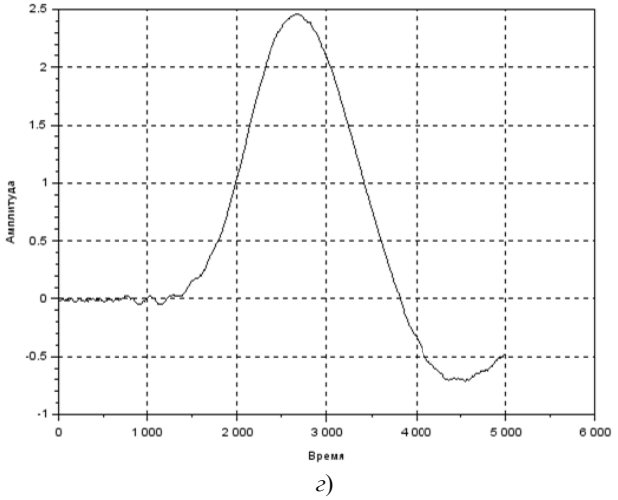
Рис. 4. Отфильтрованный сигнал феррозонда фильтром Баттерворта 3 порядка (начало)



б)



в)



г)

Рис. 4. Отфильтрованные сигналы феррозонда фильтром Чебышева 1 3 порядка (*б*), фильтром Чебышева 2 3 порядка (*в*) и эллиптическим фильтром 3 порядка (*г*) (окончание)

Заключение

Наличие помех аналогового сигнала приводит к неустойчивой работе младшего разряда аналого-цифрового преобразователя. Для снижения помех сигналов феррозонда необходимо согласовывать амплитуду сигнала феррозонда и входные характеристики аналого-цифрового преобразователя. Для снижения помех оцифрованного сигнала феррозонда реально применение цифровых фильтров. Цифровые фильтры Баттерворта, Чебышева и Кауэра одного порядка снижают уровень помех примерно на одном уровне. Повышение порядка фильтра незначительно влияет на уровень помех.

Список литературы

1. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. – Ленинград : Энергия, 1979. – 320 с.

2. Баранова, В. Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.11.01 / Баранова Виталия Евгеньевна. – Томск, 2015. – 18 с.

3. Болдырев, В. Т. Устройство для измерения напряженности магнитного поля / В. Т. Болдырев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 86–87.

4. Алексеев, Е. Р. Scilab: Решение инженерных и математических задач / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова, Е. А. Рудченко. – Москва : ALT Linux ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 260 с.

Digital Processing of Fluxgate Sensor Output Signals

© V. D. Shapovalov[1], V. P. Kucher[1] ✉, V. S. Bezkorovayny[2]

[1] *Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, vkucher86@mail.ru;*
[2] *Department of Electromechanics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Russian Federation*

Keywords: signal processing; fluxgate sensor; Butterworth filter; Chebyshev filter; digital signal; digital filter; elliptic filter.

Abstract: Methods for the digital processing of signals from fluxgate sensors are presented. The causes of output signal distortion due to noise and interference are examined; so is the impact of the ratio between signal amplitude and the analog-to-digital converter input range on digitization quality. The performance of Butterworth, Chebyshev, and elliptic digital filters is compared using the SciLab simulation environment. Improvements in measurement accuracy and reliability resulting from reduced noise levels and enhanced digitized signal quality are demonstrated.

References

1. Afanasyev Yu.V., Studentsov N.V., Khorev V.N., Chechurina E.N., Shchelkin A.P. *Sredstva izmereniy parametrov magnitnogo polya* [Instruments for Measuring Magnetic Field Parameters], Leningrad: Energiya, 1979,320 p. (In Russ.)

2. Baranova V.E. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Tomsk, 2015, 18 p. (In Russ.)

3. Boldyrev V.T. [Device for measuring magnetic field strength], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 1, pp. 86-87. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Alekseev E.R., Chesnokova O.V., Rudchenko E.A. *Scilab: Resheniye inzhenernykh i matematicheskikh zadach* [Scilab: Solving Engineering and Mathematical Problems], Moscow: ALT Linux; BINOM. Knowledge Laboratory, 2008, 260 p. (In Russ.).

Digitale Verarbeitung der Ausgangssignale von Ferrosonden

Zusammenfassung: Es sind Methoden zur digitalen Verarbeitung von Ferrosonden-Sensoren vorgestellt. Die Ursachen von Signalverzerrungen durch Rauschen und Störungen sowie der Einfluss des Verhältnisses von Signalamplitude zu Eingangsspannungsbereich des Analog-Digital-Wandlers auf die Digitalisierungsqualität sind betrachtet. Die Effektivität von Butterworth-, Chebyshev- und elliptischen Digitalfiltern ist in der SciLab-Modellierungsumgebung verglichen. Durch die Reduzierung des Rauschpegels und die Verbesserung der Qualität des digitalisierten Signals ist eine höhere Messgenauigkeit und -zuverlässigkeit erzielt.

Traitement numérique des signaux de sortie des ferrosondes

Résumé: Sont présentées les méthodes du traitement numérique du signal des capteurs ferrosondes. Sont examinées les causes de la distorsion du signal de sortie par le bruit et les interférences, l'influence du rapport d'amplitude du signal et de la plage d'entrée du convertisseur analogique-numérique sur la qualité de la numérisation. Est présentée une comparaison de l'efficacité des filtres numériques de Butterworth, de Chebychev et delui elliptique dans le cadre de la modélisation SciLab. Est démontrée une amélioration de l'exactitude et de la fiabilité des mesures grâce à la réduction du niveau de bruit et à l'amélioration de la qualité du signal numérisé.

Авторы: ***Кучер Василий Павлович*** – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии»; ***Шаповалов Валентин Дмитриевич*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии»; ***Безкоровайный Владимир Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Российская Федерация.

УДК 004.891
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.398-407

ПРИМЕНИМОСТЬ НЕЙРОСЕТЕВЫХ КОМПОНЕНТ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КОНТУРЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА

© Г. А. Наурусова[1], В. М. Балашов[2] ✉, Е. Г. Семенова[1], М. С. Смирнова[1]

[1] *Кафедра «Программная инженерия и интеллектуальные системы», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация;*
[2] *АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», balashov_vm@radar-mms.com; Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Ключевые слова: автоматизация процессов; дистанционное зондирование геопространства; информационно-измерительные системы; кибернетическая интеллектуализация; нейросетевые компоненты.

Аннотация: Современный этап развития всего класса дистанционно-зондирующих информационно-измерительных систем характеризуется широким и активным внедрением в их состав средств и компонент искусственного интеллекта, прежде всего нейросетевых компонент. Такое внедрение направлено на качественное улучшение возможностей указанных систем, совершенствование процессов принятия автоматизированных решений по прикладной интерпретации проводимых зондирующих измерений, по оптимизации режимов и схем функционирования. Задача быстрого и качественно-нового наращивания функционала систем дистанционно-зондирующих информационно-измерительных систем решается путем внедрения в состав прикладного программного обеспечения контуров управления систем нейросетевых компонент.

Введение

В современных условиях активного развития информационных технологий искусственного интеллекта (**ИИ**) нейросетевые компоненты находят все большее применение в контуре принятия решений информационно-измерительных систем дистанционного зондирования геопространства, что направлено на улучшение процессов принятия автоматизированных решений, в частности, по прикладной интерпретации проводимых зондирующих измерений, оптимизации режимов и схем функционирования. Класс информационно-измерительных систем дистанционного зондирования (**ИИзмС ДЗ**) геопространства включает в себя различные системы выявления обстановки и состояния географических районов, такие как радиолокационные и гидроакустические комплексы, экомониторинговые и лидарные станции раннего обнаружения, системы дистанционного зондирования земной поверхности и т.п.

Автоматизация процессов управления ресурсами различных систем (в том числе и информационно-измерительных), изначально призванная избавить лиц, принимающих различные решения, от рутинных расчетных и логико-алгоритмических, повторяющихся однотипно-монотонных операций на современном этапе развития достигла уровня, когда стала возможным передача при-

кладного функционала на разработанные целевым образом программно-технические средства и комплексы. Эта тенденция отразилась на текущем уровне совершенствования прикладного программного обеспечения в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ геопространства в виде включения в его состав компонент ИИ [1 – 5].

Компоненты программного обеспечения, которые реализуют прикладную функциональность нейросетевой информационной технологии в составе контура принятия решений ИИзмС ДЗ геопространства, называются нейросетевыми компонентами. При этом в силу специфики нейросетевой технологии реализуемый такими компонентами прикладной функционал кардинально различается от исполнения к исполнению ИИзмС ДЗ. Вместе с тем проведенное авторами в ходе исследования обобщение позволило выделить определенный круг частных задач прикладной функциональности, возлагаемых в ИИзмС ДЗ на нейросетевые компоненты ИИ.

Внедрение именно нейросетевых компонент в состав контура принятия решений ИИзмС ДЗ обеспечивает то новое качество управления ресурсами, режимами и применением перспективных образцов информационно-измерительных систем зондирующего типа, которое традиционно связывают с ИИ и всем процессом кибернетической интеллектуализации.

Использование нейросетевых компонент в контуре принятия решений систем дистанционного зондирования

Актуальные тенденции развития всей софтверной индустрии убедительно показывают, что общий тренд увеличения объема прикладных задач и функциональности, реализуемых в перспективных ИИзмС ДЗ нейросетевыми компонентами программного обеспечения, будет в обозримом будущем только возрастать. Новое интеллектуальное качество и принципиально более высокий уровень программной сложности задач, которые решаются с помощью информационных технологий ИИ, и прежде всего технологий глубоких нейронных сетей (**ГНС**), определяют характер всего процесса сбора, обработки, организации хранения и выдачи потребителям измеренных данных и их предметных обобщений, интерпретаций в современных, перспективных образцах ИИзмС ДЗ.

В указанных условиях становится очевидной необходимость детализированной разработки, комплексной стыковки и отладки соответствующей научно-методической платформы (базового набора методологических инструментов) для оценки текущего состояния разработки и рисков применения нейросетевых компонент ИИ в составе искомых систем, а также для определения стратегии доработки и совершенствования таких компонент (то есть их машинного дообучения, дополнительного тестирования, обоснованной корректуры и т.п.) [5, 6].

Применимость нейросетевых компонент ИИ в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ геопространства выявляется, как правило, на основании итогов сравнительно-корреляционного анализа состава задач, которые предстоит решать рассматриваемой ИИзмС ДЗ, и требуемого уровня автоматизации их решения [1, 6 – 8]. Алгоритмика такого анализа является общепризнанной в сфере технологий ИИ. Само решение о применимости того или иного образца нейросетевой компоненты ИИ в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ геопространства принимается с учетом обеспечения возможности полноценного машинного обучения нейросети под соответствующий круг решаемых задач, а также дальнейшего дообучения в процессе эксплуатации указанной компоненты в составе системы[1, 8 – 10].

Именно вся полнота собранных, гармонизированных и системно-интегрированных данных о всех аспектах использования ИИ в конкретизированных условиях проектируемой (создаваемой, проектируемой или разрабатываемой) системы

искомого класса, получаемых с использованием базового набора методологических инструментов, есть база факторов, на которой принимается решение о применении нейросетевых компонент и соответствующих информационных технологий в ИИзмС ДЗ. В качестве принципиальных направлений использования тех или иных методов, способов, методик, правил и алгоритмов из состава базового набора методологических инструментов в ходе исследования выделены:

– выработка принципов и алгоритмики установления приоритетности в последовательности задач нейросетевых компонент ИИ в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ;

– критический анализ возможностей применения альтернативных, более простых в реализации программно-алгоритмических моделей решения стоящих прикладных задач;

– определение комплекса показателей и критериев оценки результативности, эффективности и качества внедрения, применения по назначению нейросетевых компонент ИИ в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ геопространства с целью получения итогового (финального) предписания о достигнутом уровне интеллектуализации данных систем после внедрения в их состав искомых компонент; постановка и решение на базе методов системного анализа сопутствующих оптимизационных задач;

– выдвижение и последовательная проверка множества гипотез об особенностях и узкой специфике интеграции конкретизированных исполнений нейросетевых компонент ИИ в контуры принятия решений ИИзмС ДЗ с заданными программно-аппаратной архитектурой, структурами баз данных и знаний и другими уточненными параметрами их построения; выявление наиболее рациональной или оптимальной схемы указанной системной интеграции;

– прогнозирование изменений потребительских свойств нейросетевых компонент ИИ при их долгосрочной эксплуатации и естественном дообучении в составе программно-аппаратных средств контура принятия решений ИИзмС ДЗ. Поиск путей и способов своевременного выявления, локализации и преодоления аномалий обучения и функционирования нейросетевых компонент ИИ, таких как «переобучение», «паралич сети», «галлюцинации ИИ» и пр.

В результате проведенного первичного частного исследования предметной области структур и приемов машинного обучения компонент ИИ на платформе сверхточных ГНС, востребованных мировым и отечественным приборостроением при создании ИИзмС ДЗ различных классов и назначений, предложена следующая обобщенная функциональная схема анализа типовой логической архитектуры нейросетевого компонента в контуре принятия решений указанных систем, представленная в сводном виде на рис. 1.

Качество обучения нейронных сетей как интерпретирующего, так и генеративного ИИ не бывает абсолютным. Существуют известные коллизии в их развитии на базе больших данных (такие как проблема перенаучения, «глюцинации» ИИ и т.д.). В силу вышеуказанного каждое внедрение нейросетевых компонент в контур принятия решений ИИзС ДЗ нуждается в предварительной оценке соответствующих рисков (рисков возникновения ущерба от некорректных решений, принимаемых средствами ИИ).

Однако на сегодняшний день такая оценка рисков проводится во многом эмпирически, по междисциплинарному принципу. Совокупность специализированного научно-методического инструментария оценки рисков применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ, учитывающих узкую специфику этой наукоемкой предметной области, недостаточна.

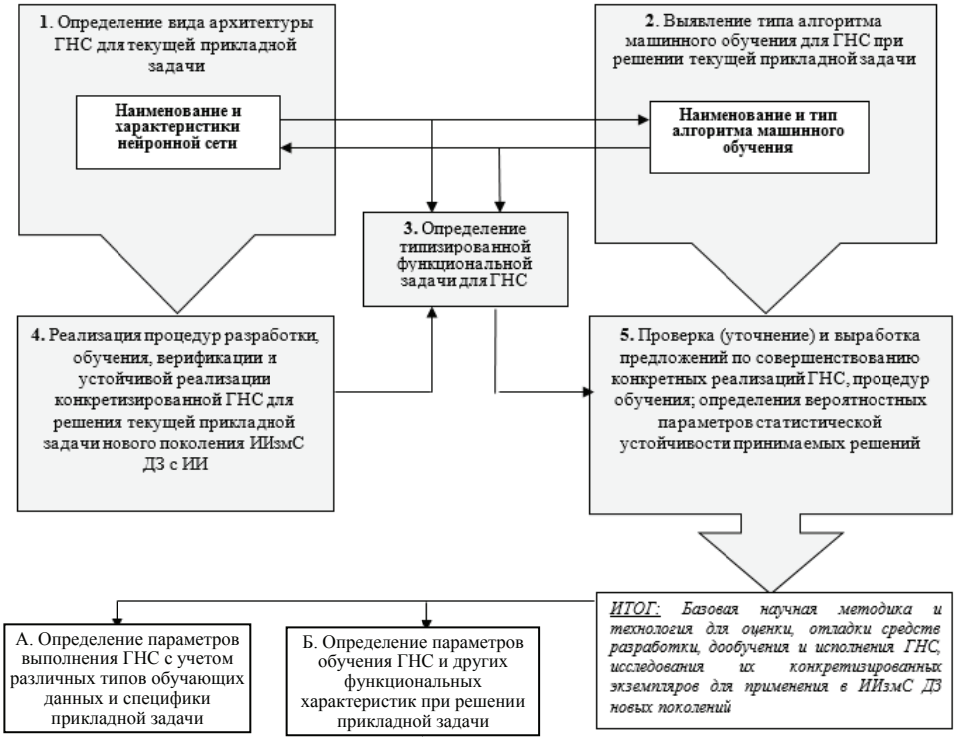


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема анализа типовой логической архитектуры нейросетевого компонента в контуре принятия решений ИИзмС ДЗ

Оценка рисков применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства, как правило, состоит из следующих взаимоувязанных функций:

1) синтеза и приоритезации иерархической системы рисков;
2) непосредственного неинструментального измерения начальных рисков;
3) приведения шкал для сводных показателей в иерархической системе рисков;
4) расчета значений сводных и интегрального рисков;
5) анализ и интерпретация полученных значений рисков.

Первая функция дает возможность синтезировать иерархическую систему рисков для случаев применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства в виде множества показателей риска и установления связей между ними. Синтез и приоритезация иерархической системы рисков G для их оценки в своей научно-методической основе базируется на системном методе дерева целей и задач.

Все виды рисков для различных случаев применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства должны быть учтены в определенной иерархической системе G. Множество рисков (то есть показателей оценки рисков) X состоит из соответствующих подмножеств $\{\widetilde{x}_i\}$, синтезируемых на базе подмножеств простых рисков. При этом риск понимается как

$$R = up, \tag{1}$$

где R –значение риска; u – значение ожидаемого ущерба при наступлении негативных событий (события риска); p – вероятность наступлении негативных событий (события риска).

Значение риска не имеет физической меры.

На формуле риска (1) базируется весь математический аппарат риск-менеджмента, хеджирования и локализации рисков и пр. Вместе с тем указанный математический аппарат непосредственно недостаточно адаптирован для использования в предметной области рисков применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства, в силу многоаспектного характера формирования ущерба от потенциальных ошибок ИИ.

Приоритезация, то есть выявление веса агрегирования, каждого из рисков в составе иерархической системы G осуществляется с применением математического аппарата нормированного геометрического среднего. На основе частных приоритетов вычисляются общие приоритеты для каждого сводного и интегрального риска $r_i \in R$ в иерархической системе G. Они позволяют понять уровень приоритетности оценки по текущему риску на обобщенно-интегральный вывод о значении суммарно-итогового риска применения конкретизированных нейросетевых компонент в контуре принятия решений текущей ИИзС ДЗ геопространства.

Вторая функция дает возможность непосредственного неинструментального измерения начальных рисков в термах лингвистической переменной, а также представления результатов таких измерений в количественном виде. При этом используются номинальные (то есть качественно-описательные) шкалы для неинструментального измерения вероятности наступления неблагоприятных событий от решений ИИ и уровней потенциального ущерба от указанных событий. На основе таких номинальных шкал, согласно выражению (1), формируется шкала уровней риска применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства.

Приведение шкал для сводных показателей в иерархической системе рисков осуществляется за счет математической свертки начальных рисков в интегральный риск в виде мягких числовых значений с использованием математического аппарата одной из нечетких алгебр. Так, за основу была взята алгебра нечетких чисел и базирующийся на ней математический аппарат лингвистических переменных. Уровни составляющих начального риска представлены в виде лингвистических переменных:

$$B1 = \text{«вероятность неблагоприятных событий»}; \quad (2)$$

$$B2 = \text{«размер потенциального ущерба»}. \quad (3)$$

В обобщенном варианте для указанных $B1$ и $B2$ лингвистическая переменная $B^{\wedge}$ определяется, согласно [9], так

$$B^{\wedge} = \left\langle \beta, F^{\wedge}(\beta), X^{\wedge}, G^{\wedge}, M^{\wedge} \right\rangle, \quad (4)$$

где β – имя для лингвистической переменной; $F^{\wedge}(\beta)$ – терм-множество лингвистической переменной β, то есть множество вербальных (словесно-описательных) значений переменной β, причем каждое из этих значений является нечеткой переменной с областью определения $X^{\wedge}$; $G^{\wedge}$ – синтаксическое правило, обычно имеющее форму грамматики, порождающее значения $\alpha^{\wedge}$ нечетких переменных вербальных значений лингвистической переменной β ($\alpha^{\wedge} \in F^{\wedge}(\beta)$); $M^{\wedge}$ – семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной $\alpha^{\wedge} \in F^{\wedge}(\beta)$ нечеткое множество. В ходе вышеуказанного частного исследования предметной области построены функции принадлежности μ_T^B термов для (2) и (3) в виде нечетких чисел.

Тогда оценка интегрального риска в конечном итоге приходит к синтезу матрицы риска. Матрица риска увязывает следующие значения: неинструментальные измерения вероятностей неблагоприятных событий с экспертными заключениями о потенциальном ущербе. При этом каждый проиндексированный элемент матрицы риска есть значение уровня риска, задающего суть внешнего реагирования на соответствующее значение риска. Такое отображение уровней шкалы вероятности наступления и потенциального ущерба в виде значений лингвистических переменных (2) и (3) дает возможность рассмотреть любой из индексированных элементов указанной матрицы для начальных рисков применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства как нечеткое число

$$\widetilde{B}_{ij} = \text{«риск по текущему показателю оценки»}. \quad (5)$$

Оно есть произведение лингвистических переменных вида (2) и (3), то есть *i*-го терма от *B*1 и *j*-го терма от *B*2. Так как терм-множества лингвистических переменных (2) и (3) для простых рисков даются в формате нечетких чисел, то функции принадлежности $\mu_T^{\widetilde{B}_{ij}}$ для значений $\widetilde{B}_{ij}$ рассчитываются по алгоритмике перемножения нечетких, интервальных чисел из алгебры мягких вычислений.

Функция приведения шкал для сводных показателей в иерархической системе рисков подразумевает, что имея начальные риски, агрегированные в виде сводного нечеткого числа, далее следует осуществлять учет рисков по значениям показателя (5). Тогда приведение шкал для сводных показателей в иерархической системе рисков будет заключаться в расчете кривых принадлежности для нечетких чисел $\mu_T^{\widetilde{B}_{ij}}$ для значений $\widetilde{B}_{ij}$. В ходе исследования разработан алгоритм (алгоритмическая процедура) расчета кривых принадлежности нечетких чисел $\mu_T^{\widetilde{B}_{ij}}$ как термов лингвистической переменной $\widetilde{B}_{ij}$.

При расчете значений сводных и интегрального рисков применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства как нечетких чисел в числовом виде Y_P и в представлении терма соответствующей лингвистической переменной $\hat{Y}_P$ они вносятся на нормированную шкалу (5), а далее они анализируются на предмет уровня совпадения кривых принадлежности $\mu_T^{\widetilde{B}_{ij}}$ текущей оценки риска с градациями рисков R' для текущего риск-показателя r_i в иерархической системе *G* оценки рисков так:

$$\widetilde{B}_{ij} = \{\text{"УМЕРЕННЫЙ "/0,9;"ВЫСОКИЙ"/0,8}\}. \quad (6)$$

На завершающем шаге реализуется функция анализа и интерпретации полученных значений рисков.

В частности, интегральный риск для событий применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства в целом описывается как

$$Y = f(y_1(r_1), y_2(r_2), ..., y_i(r_i), ..., y_n(r_n)), \quad (7)$$

где $y_i(r_i)$ $\left(i = \overline{1,n}\right)$ – риск по *i*-му начальному показателю r_i; *n* – количество начальных рисков в иерархической системе оценки ($n < \rho$); ρ – суммарное число рисков, учитываемых при оценке. Исполнение ряда граничных условий дало воз-

можность математически выразить интегральный риск для событий применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений ИИзС ДЗ геопространства в аддитивной

$$Y = \sum_{i=1}^{n} y_i(r_i), \tag{8}$$

в нормированной аддитивной

$$Y = \sum_{i=1}^{n} k_i y_i(r_i) \tag{9}$$

и в мультипликативной

$$Y = \prod_{i=1}^{n} y_i(r_i) \tag{10}$$

алгебраических формах. Апробация и валидация предлагаемого подхода к количественному выражению и учету рисков событий применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений информационно-измерительных систем дистанционного зондирования геопространства позволили прийти к заключению: число начальных рисков, включаемых со своими коэффициентами в сводные риски для рассматриваемой предметной области, попадает в граничные значения от 30 до 50. На практике это означает, что любое фактически значимое число рассматриваемых рисков может быть учтено количественно, согласно формул (8) – (10).

Заключение

Таким образом, исследование предметной области создания и применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений информационно-измерительных систем дистанционного зондирования геопространства, с точки зрения структурной логичности построения, заключалось в обоснованном уточнении, детализации и программно-техническом моделировании предложенной функциональной схемы. Результирующим итогом указанных процессов проведенного исследования стали обоснование, разработка и научная верификация научно-технических путей получения:

– оценок и приоритетов опасности рисков применения нейросетевых компонент в контуре принятия решений информационно-измерительных систем дистанционного зондирования геопространства;

– варианта автоматизированного дообучения генеративной нейросети для снижения рисков ее применения в составе указанного класса систем;

– итогового заключения о достаточности машинного обучения на текущем этапе разработки,

а также сводный анализ технологичности автоматизированного создания соответствующего программного обеспечения.

При этом алгоритмика обучения нейросетевых компонент ИИзмС ДЗ, реализуемых преимущественно на базе сверточных ГНС, в современных условиях, как правило, исполняется по схеме реализации функционала машинного обучения нейросетевых компонент в составе сложной системы программного обеспечения.

Список литературы

1. Галушкин, А. И. Сфера применения нейрокомпьютеров расширяется / А. И. Галушкин. – Москва : ИПРЖР, 2001. – 24 с. – (Приложение к журналу Информационные технологии; № 10/2001).

2. Галушкин, А. И. Нейрокомпьютеры и их применение. Кн. 1 : Теория нейронных сетей : учебное пособие для вузов / А. И. Галушкин. – Москва : Радиотехника, 2000. – 415 с.

3. Сигеру, О. Нейрокомпьютеры и их применение. Кн. 2 : Нейроуправление и его приложения = Neuro-control and its applications / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф ; пер. с англ. Н. В. Батина ; под общ. ред. А. И. Галушкина, В. А. Птичкина. – Москва : ИПРЖР, 2000. – 271 с.

4. Комашинский, В. И. Введение в нейроинформационные технологии / В. И. Комашинский, Д. А. Смирнов. – Санкт-Петербург : Тема, 1999. – 92 с.

5. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2001. – 380 с.

6. Барский, А. Б. Параллельные процессы в вычислительных системах: Планирование и организация / А. Б. Барский. – Москва : Радио и связь, 1990. – 255 с.

7. Барский, А. Б. Обучение нейросети методом трассировки / А. Б. Барский // VIII Всероссийская конференция «Нейрокомпьютеры и их применение» : НКП–2002 : тезисы докладов. – Москва, 2002. – С. 24–27.

8. Нейрокомпьютеры и их применение. Кн. 5 : Нейронные сети: История развития теории : учебное пособие для студентов / Под ред. А. И. Галушкина, Я. З. Цыпкина. – Москва : Радиотехника, 2001. – 840 с.

9. Горбань, А. Н. Обучение нейронных сетей / А. Н. Горбань. – Москва : ПараГраф, 2020. – 160 с.

10. Базовые информационные технологии измерительных и управляющих систем / И. А. Селезнев, Я. А. Ивакин, И. И. Дементьев, М. С. Смирнова. – Санкт-Петербург : Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2024. – 180 с.

Applicability of Neural Network AI Components within the Decision-Making Loop of Geospatial Remote Sensing Information-Measurement Systems

© G. A. Naurusova[1], V. M. Balashov[2] ✉, E. G. Semenova[1], M. S. Smirnova[1]

[1] *Department of Software Engineering and Intelligent Systems, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation;*
[2] *"Radar mms" Scientific and Production Enterprise" JSC, balashov_vm@radar-mms.com; St. Petersburg, Russian Federation*

Keywords: process automation; geospatial remote sensing; information-measurement systems; cybernetic intellectualization; neural network components.

Abstract: The current stage of development for the entire class of remote sensing information-measurement systems is characterized by the widespread and active integration of artificial intelligence tools and components, specifically neural network components, into their architecture. This integration aims to qualitatively enhance system capabilities and improve automated decision-making processes regarding the applied interpretation of sensing measurements and the optimization of operational modes and schemes. The challenge of rapidly and qualitatively expanding the functionality of remote sensing information-measurement systems is addressed by incorporating neural network components into the control loops of the systems' application software.

References

1. Galushkin A.I. *Sfera primeneniya neyrokomp'yuterov rasshiryayetsya* [The Scope of Neurocomputer Application Is Expanding], Moscow: IPRZhR, 2001, 24 p. (*Prilozheniye k zhurnalu Informatsionnyye tekhnologii* [Supplement to the Journal Information Technologies], no. 10, 2001). (In Russ.)
2. Galushkin A.I. *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and Their Application], Book 1: *Teoriya neyronnykh setey: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Neural Network Theory: A Textbook for Higher Education Institutions], Moscow: Radiotekhnika, 2000, 415 p. (In Russ.)
3. Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiya Yusof; Galushkin A.I., Ptichkin V.A. (Eds.) *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and Their Application], Book 2: *Neuro-control and its applications*, Moscow: IPRZhR, 2000, 271 p. (In Russ.)
4. Komashinskiy V.I., Smirnov D.A. *Vvedeniye v neyroinformatsionnyye tekhnologii* [Introduction to Neuro-information Technologies], St. Petersburg: Tema, 1999, 92 p. (In Russ.)
5. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennyye neyronnyye seti. Teoriya i praktika* [Artificial Neural Networks: Theory and Practice], Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2001, 380 p. (In Russ.)
6. Barskiy A.B. *Parallel'nyye protsessy v vychislitel'nykh sistemakh: Planirovaniye i organizatsiya* [Parallel Processes in Computing Systems: Scheduling and Organization], Moscow: Radio i svyaz', 1990, 255 p. (In Russ.)
7. Barskiy A.B. *VIII Vserossiyskaya konferentsiya "Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye": NKP– 2002: tezisy dokladov* [VIII All-Russian Conference "Neurocomputers and Their Applications" (NKP–2002): Abstracts], Moscow, 2002, pp. 24-27. (In Russ.)
8. Galushkin A.I., Tsypkin Ya.Z. (Eds.) *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and Their Application], Book 5: *Neyronnyye seti: Istoriya razvitiya teorii: uchebnoye posobiye dlya studentov* [Neural Networks: History of the Development of the Theory: Textbook for students], Moscow: Radiotekhnika, 2001, 840 p. (In Russ.)
9. Gorban' A.N. *Obucheniye neyronnykh setey* [Training Neural Networks], Moscow: ParaGraf, 2020, 160 p. (In Russ.)
10. Seleznev I.A., Ivakin Ya.A., Dement'yev I.I., Smirnova M.S. *Bazovyye informatsionnyye tekhnologii izmeritel'nykh i upravlyayushchikh sistem* [Basic Information Technologies for Measurement and Control Systems], St. Petersburg: Izdatel'stvo BGTU "VOYENMEKH" im. D.F. Ustinova, 2024, 180 p. (In Russ.)

Anwendbarkeit neuronaler Netzwerkkomponenten der künstlichen Intelligenz im Entscheidungskreislauf von Informations- und Messsystemen der Fernerkundung des Georaums

Zusammenfassung: Die aktuelle Entwicklungsphase der Fernerkundungssysteme ist durch den weitverbreiteten und aktiven Einsatz von Werkzeugen und Komponenten der künstlichen Intelligenz, insbesondere neuronaler Netze, gekennzeichnet. Ziel dieses Einsatzes ist die qualitative Verbesserung der Systemleistung, die Optimierung automatisierter Entscheidungsprozesse für die angewandte Interpretation von Sondierungsmessungen sowie die Optimierung von Betriebsmodi und -schemata. Die rasche und qualitative Erweiterung der Funktionalität von Fernerkundungssystemen wird durch die Integration neuronaler Netze in die Anwendungssoftware der Regelkreise erreicht.

Application des components de network artificiel d'intelligence artificiel au contour de la prise des décisions des sistèmes d'information et de mesure de sondage géospatiale

Résumé: L'étape actuelle du développement de toute la classe des systèmes d'information et de mesure à sondage à distance se caractérise par l'intégration large et active des moyens et des composants d'intelligence artificielle, notamment des composants neuralement modulés. Cette intégration vise à améliorer qualitativement les capacités de ces systèmes, à perfectionner les processus de la prise de la décision automatisée concernant l'interprétation appliquée des mesures de sondage effectuées, ainsi qu'à optimiser les régimes et les schémas du fonctionnement. La problématique d'un renforcement rapide et qualitative des fonctions des systèmes de sondage à distance et de mesure est résolue par l'intégration des composants neuronaux dans le logiciel appliqué des circuits de contrôle de ces systèmes.

Авторы: ***Наурусова Гульнара Ахмановна*** – старший преподаватель кафедры Н2 «Программная инженерия и интеллектуальные системы», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ***Балашов Виктор Михайлович*** – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального конструктора по программно-целевому развитию, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ***Семенова Елена Георгиевна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Н2 «Программная инженерия и интеллектуальные системы»; ***Смирнова Мария Сергеевна*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Н2 «Программная инженерия и интеллектуальные системы», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

УДК 004.946:004.42:615.8
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.408-423

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ АДАПТАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

© А. Е. Архипов[1] ✉, А. А. Божий[1], В. С. Круглов[2]

[1] *Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» , alexeiarh@gmail.com, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[2] *Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: адаптивный тренажер; биологическая обратная связь; виртуальная реальность; двигательная активность; динамическая адаптация; программный модуль; управление сложностью.

Аннотация: Представлен программный модуль адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью для стимуляции двигательной активности пользователя. Метод адаптации предусматривает повышение, сохранение или снижение сложности, сглаживание управляющего воздействия и ограничение изменения параметров сцены. Определен состав входных и выходных данных модуля. Разработана архитектура программного обеспечения. Программная реализация представлена VR-сценарием с последовательным наступанием на целевые платформы. Реализованы правила снижения скорости при повторяющихся ошибках, повышения скорости при устойчивом выполнении и недостаточной нагрузке, ограничения максимального значения и экстренной остановки при превышении верхней границы пульса. Отмечено, что модуль может использоваться как программная основа исследовательских и тренировочных VR-систем, в которых параметры упражнения изменяются по физиологическим и двигательным данным пользователя.

Введение

Виртуальная реальность является одним из направлений цифровизации тренажерных и реабилитационных технологий, поскольку позволяет организовать двигательное действие в наглядной, управляемой и эмоционально привлекательной среде. В отличие от традиционного упражнения, выполняемого по словесной инструкции или по заранее заданной траектории, VR-сценарий может включать изменяемые объекты, динамическую обратную связь, визуальное подкрепление результата и элементы соревнования с самим собой [1]. За счет этого пользователь получает не только внешнюю инструкцию, но и непрерывный поток информации о результате собственных действий [2].

В исследованиях по виртуальной реабилитации подчеркивается, что важным преимуществом виртуальной среды является возможность создавать интерактивные и мотивирующие условия выполнения двигательных заданий, а также регистрировать параметры выполнения упражнения. В работах, посвященных биологической обратной связи, отмечается, что в реабилитационных системах могут использоваться как биомеханические измерения, так и показатели физиологических

систем организма, включая сердечно-сосудистые, дыхательные и нервно-мышечные параметры [1]. Это делает возможным переход от простой визуализации упражнения к построению замкнутого контура адаптации, в котором виртуальная среда реагирует на текущее состояние пользователя [3 – 6].

Однако наличие VR-сцены и биологической обратной связи сами по себе не обеспечивают индивидуализацию упражнения. Во многих программных решениях параметры задания задаются заранее и остаются неизменными в течение всего занятия: скорость движения объектов, расстояние между целями, размер интерактивной зоны, частота появления стимулов и правила начисления баллов фиксируются разработчиком или инструктором [2]. В результате один и тот же сценарий может быть слишком простым для подготовленного пользователя и слишком сложным для пользователя с ограниченными двигательными возможностями. В первом случае быстро снижается интерес к занятию, во втором – возрастает риск утомления, ошибок и отказа от выполнения задания [7, 8].

Особую значимость эта проблема приобретает при разработке виртуальных двигательных тренажеров, ориентированных на стимуляцию двигательной активности. Для такого класса систем требуется программный модуль, который не только отображает данные о пульсе, скорости или успешности выполнения, но и преобразует эти данные в управляющее воздействие на виртуальную сцену. В этом случае параметры сцены становятся адаптивными: они изменяются в зависимости от состояния пользователя, качества выполнения движения и целевого режима нагрузки [9, 10].

Современные исследования подтверждают, что динамическое изменение сложности виртуальных упражнений может выполняться по физиологическим показателям пользователя. В частности, регулирование сложности VR-exergame по частоте сердечных сокращений применялось для поддержания целевого диапазона нагрузки. В других системах параметры движения регистрируются сенсорами, а точность выполнения используется для формирования обратной связи и персонализации тренировочного задания. Развиваются также универсальные контроллеры динамической сложности, способные обрабатывать поток пользовательских данных и изменять параметры серьезной игры в реальном времени [10, 11].

Сопоставление известных подходов показывает, что отдельные элементы предлагаемого решения – адаптация по частоте сердечных сокращений, регистрация качества движения, игровая обратная связь и динамическое изменение сложности – уже применялись в VR-системах. Отличительной особенностью разрабатываемого модуля является их объединение в едином контроллере, который принимает решение о повышении, сохранении или снижении сложности на основе совместного анализа физиологической нагрузки, результативности упражнения и устойчивости серии успешных действий. Дополнительно предусматриваются сглаживание управляющего воздействия, ограничение скорости изменения параметров сцены и журналирование причин адаптации [5, 11, 12].

Таким образом, нерешенной остается задача построения воспроизводимого программного контура адаптации двигательного VR-задания, который не повышает сложность только на основании недостаточной физиологической нагрузки, если одновременно снижается качество движения. Предполагается, что совместный учет физиологического и двигательного каналов позволит исключить необоснованное усложнение сценария и обеспечить более предсказуемое управление виртуальной средой.

Цель работы – разработка программного модуля адаптации виртуальной среды с интеграцией биологической обратной связи, обеспечивающего управление параметрами VR-сцены, формирование мотивационной обратной связи и стимуляцию двигательной активности пользователя.

Для достижения указанной цели необходимо определить состав входных и выходных данных модуля; формализовать задачу управления параметрами сцены; разработать архитектуру программного обеспечения; предложить метод изменения сложности с совместным учетом физиологической нагрузки и качества движения; реализовать демонстрационный VR-сценарий; подготовить методику технической и сравнительной проверки разработанного решения.

Материалы и методы

Объект исследования и постановка задачи

Объект исследования – программный модуль адаптивного управления параметрами двигательного VR-задания. *Предмет исследования* – правила преобразования физиологических и двигательных данных пользователя в управляющие воздействия на виртуальную сцену.

Программный модуль реализован в среде Unity с использованием языка C#. Регистрация двигательной активности осуществляется инерциальной измерительной системой, включающей три датчика, размещенные в области поясницы и на нижних конечностях пользователя. Измерения поступают с частотой 100 Гц и проходят на персональном компьютере последовательные этапы приема, буферизации, фильтрации и преобразования. Сформированные параметры движения передаются в виртуальную среду и используются для управления объектами сцены. Частота сердечных сокращений (**ЧСС**) регистрируется внешним медицинским устройством и применяется в качестве основного физиологического показателя при адаптации сложности двигательного задания [13, 14].

Рассматриваемый программный модуль предназначен для включения в состав виртуального двигательного тренажера с биологической обратной связью. Пользователь выполняет двигательное задание в виртуальной среде, а система получает данные о его физиологическом состоянии, скорости выполнения движения и результативности взаимодействия с объектами сцены. На основе этих данных модуль должен определить, необходимо ли изменить сложность задания, сохранить текущий режим или перейти к более щадящим параметрам.

Состояние пользователя в момент времени t представим вектором

$$x(t) = \{ h(t), v(t), q(t), r(t), c(t) \}, \quad (1)$$

где $h(t)$ – частота сердечных сокращений; $v(t)$ – скорость движения или темп выполнения упражнения; $q(t)$ – показатель качества выполнения двигательного действия, определяемый по точности наступания на целевую платформу; $r(t)$ – результативность упражнения за текущий интервал; $c(t)$ – длина серии успешных действий. В демонстрационном сценарии точность наступания оценивается по расстоянию от положения стопы до центра платформы и углу ее поворота. Состав вектора может расширяться при подключении дополнительных физиологических и кинематических каналов.

Параметры виртуальной сцены, изменяемые программным модулем, зададим вектором управления:

$$u(t) = \{ v_s(t), d_p(t), s_p(t), n_0(t), b(t), f(t) \}, \quad (2)$$

где $v_s(t)$ – скорость движения объектов сцены или платформ; $d_p(t)$ – расстояние между целевыми объектами; $s_p(t)$ – размер целевой области; $n_0(t)$ – число усложняющих элементов; $b(t)$ – параметры начисления баллов, бонусов и серии успешных действий; $f(t)$ – интенсивность визуальной обратной связи. В демон-

страционной реализации основными управляемыми параметрами являются скорость движения целевых платформ, правила начисления счета и визуальная индикация текущих показателей.

Целевое состояние пользователя определяется вектором

$$x^* = \left\{ h^*, v^*, q^*, r^*, c^* \right\}, \tag{3}$$

где h^* соответствует индивидуально заданному диапазону физиологической нагрузки; v^* – требуемому темпу движения; q^* – минимально допустимому качеству выполнения; r^* и c^* – целевым значениям результативности и устойчивости выполнения упражнения. Перед тренировкой специалист через web-интерфейс задает желаемый диапазон частоты сердечных сокращений, верхнюю границу пульса, начальную скорость и максимальную допустимую скорость виртуального задания.

Общая задача адаптации заключается в выборе такого управляющего воздействия, при котором параметры сцены изменяются в соответствии с текущим состоянием пользователя и не выходят за пределы безопасного диапазона:

$$u(t) = A\left(x(t), x^*, u(t-1)\right), \quad u(t) \in U_{\text{safe}}, \tag{4}$$

где A – алгоритм адаптации; U_{safe} – множество допустимых значений параметров сцены, заранее задаваемых специалистом или разработчиком сценария. Ограничения U_{safe} не являются самостоятельной медицинской оценкой безопасности, а предотвращают выход программных параметров за установленные пределы и резкое повышение сложности задания.

Таким образом, программный модуль адаптации выполняет функцию посредника между пользовательским состоянием и виртуальной сценой. Он преобразует физиологические и двигательные данные в управляемые изменения сценария, сохраняя баланс между стимулированием активности, безопасностью и понятностью обратной связи для пользователя.

Архитектура программного модуля адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью

Архитектура модуля строится по принципу разделения функций сбора данных, оценки состояния, принятия решения и управления виртуальной сценой. Такое построение позволяет изменять аппаратные средства регистрации без полной переработки программного ядра. Например, данные о движении могут поступать от VR-трекера, камеры, инерциальных датчиков или программного детектора взаимодействия с объектами сцены, однако для адаптационного алгоритма они должны быть приведены к унифицированным параметрам скорости, темпа и успешности выполнения [9, 13, 15].

Первый уровень архитектуры образует подсистема получения данных. Она принимает частоту сердечных сокращений, данные инерциальных датчиков и события взаимодействия пользователя с объектами сцены. К двигательным событиям относятся успешное наступание, пропуск платформы, изменение скорости, положение стопы и завершение серии. IMU-датчики опрашиваются с интервалом около 10 мс, а измерения объединяются общей временной меткой. Для совместимости источников входные значения приводятся к единому внутреннему формату.

Второй уровень отвечает за предварительную обработку. На этом этапе выполняются проверка допустимых диапазонов, удаление некорректных значений,

цифровая фильтрация и сглаживание кратковременных выбросов. Данные IMU используются для оценки ориентации корпуса и скорости движения. В Unity дополнительно применяются интерполяция и экспоненциальное сглаживание, что уменьшает рывки при задержках передачи или единичных потерях данных. Для физиологического канала анализируются текущее значение пульса, его среднее значение за интервал и факт выхода за установленный специалистом диапазон [14, 16].

Третий уровень представляет собой блок оценки состояния пользователя. Его задача состоит в переводе числовых данных в состояние, понятное алгоритму адаптации. Например, пользователь может находиться в одном из режимов: недостаточная нагрузка при высокой точности; оптимальная нагрузка и стабильное выполнение; избыточная нагрузка; снижение качества выполнения; аварийный режим или режим временной приостановки выполнения упражнения. Такая дискретизация упрощает принятие решений и делает поведение системы более предсказуемым для специалиста.

Четвертый уровень – контроллер адаптации. Он определяет, какие параметры сцены должны быть изменены. При недостаточной нагрузке и устойчивом выполнении контроллер может немного увеличить скорость движения платформ или уменьшить интервал между ними. При выходе пульса за верхнюю границу или при резком увеличении числа ошибок сложность должна снижаться. Важное требование к этому уровню – отсутствие резких скачков. Пользователь должен воспринимать изменение среды как естественное усложнение или упрощение задания, а не как внезапное нарушение сценария.

Пятый уровень связан с непосредственным управлением объектами виртуальной сцены. Он изменяет скорость платформ, параметры генерации целевых объектов, условия начисления очков, отображение интерфейсных индикаторов, интенсивность визуальной обратной связи и сигналы успешного выполнения. Этот уровень зависит от игрового движка и конкретной реализации сцены, но его связь с контроллером адаптации должна осуществляться через набор четко определенных параметров.

Отдельный компонент архитектуры – подсистема журналирования. Она фиксирует временные ряды физиологических показателей, события взаимодействия пользователя со сценой, изменения уровня сложности, итоговый счет и служебные сообщения. Журналирование необходимо не только для отладки программного обеспечения, но и для последующего анализа динамики занятий, сравнения режимов адаптации и подготовки материалов для экспериментальной проверки.

Методические принципы управления сложностью двигательного VR-задания

Методическая основа предлагаемого модуля состоит в том, что виртуальная среда должна не просто предъявлять пользователю задание, а поддерживать такое состояние упражнения, при котором двигательная активность сохраняется, но сложность не становится чрезмерной. В этом смысле VR-сценарий выполняет две функции: тренировочную и мотивационную. Тренировочная функция связана с требованием выполнять движение в заданном темпе и с заданной точностью. Мотивационная функция обеспечивается видимым результатом, начислением баллов, серией успешных действий и эмоционально привлекательной визуальной средой [5, 12].

Первый методический принцип заключается в поддержании индивидуально заданного диапазона физиологической нагрузки. Если ЧСС остается ниже целевого диапазона, а пользователь устойчиво выполняет упражнение, система может повысить скорость движения платформ. Если пульс превышает верхнюю границу,

повышение сложности блокируется и запускается снижение нагрузки либо экстренная остановка. Допустимый уровень нагрузки определяется специалистом, тогда как программный модуль выполняет адаптацию только в пределах заданных значений.

Второй принцип связан с учетом качества движения. Повышение сложности не выполняется только на основании низкого пульса. В демонстрационном сценарии учитываются точность наступания, число пропусков и длина серии успешных действий. Если пользователь не успевает выполнять задание или многократно теряет серию, скорость уменьшается. Благодаря этому физиологическая реакция и фактическая результативность рассматриваются совместно.

Третий принцип состоит в использовании мотивационной обратной связи. Игровые элементы не должны подменять двигательную задачу, но могут усиливать вовлеченность пользователя. Серия успешных действий позволяет показать стабильность выполнения; счет дает простой интегральный показатель результата; визуальная индикация пульса и скорости помогает пользователю понимать собственное состояние. Такой подход согласуется с представлением о геймификации как использовании элементов игрового дизайна в неигровом контексте, а также с положениями теории самодетерминации, согласно которой устойчивую вовлеченность поддерживают переживание компетентности, автономии и понятной обратной связи [12].

Четвертый принцип – сохранение прозрачности адаптации для специалиста. Управление параметрами виртуальной сцены не должно быть скрытым и непредсказуемым. Врач, инструктор или исследователь должен понимать, почему система изменила скорость платформ или уменьшила сложность. Поэтому в программной реализации целесообразно хранить не только итоговое значение сложности, но и причину изменения: выход пульса за пределы диапазона, снижение качества выполнения, успешная серия или достижение порогового значения счета.

Пятый принцип связан с постепенным усложнением двигательного задания. В начальных режимах пользователь должен освоить связь между собственным движением и объектами виртуальной сцены. После стабилизации выполнения можно повышать темп, уменьшать размер целевой зоны или вводить более сложные последовательности платформ. Такой подход позволяет избежать ситуации, когда эмоциональная привлекательность сцены сохраняется, но двигательная задача становится хаотичной и теряет методическую направленность [12].

Алгоритм адаптации параметров виртуальной сцены

Для формального описания адаптации введем интегральный показатель сложности $D(t)$, зависящий от управляемых параметров сцены [17]. В простейшем варианте он может быть представлен следующим образом:

$$D(t) = \gamma_1 v_s(t) + \gamma_2 d_p(t) - \gamma_3 s_p(t) + \gamma_4 n_0(t), \tag{5}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – весовые коэффициенты. Поскольку управляемые параметры имеют разные единицы измерения и диапазоны, перед вычислением интегрального показателя они должны быть приведены к безразмерной нормированной шкале. Увеличение скорости движения объектов и расстояния между целями повышает сложность, а увеличение размера целевой области снижает ее. Значения коэффициентов и способ нормирования должны быть приведены в окончательной реализации метода.

Изменение сложности на следующем шаге определяется состоянием пользователя:

$$D(t+1) = D(t) + \Delta D(t); \tag{6}$$

$$\Delta D(t)=\begin{cases}+\delta, & h(t)<h_{\min}\wedge q(t)\geq q_{\min};\\ 0, & h_{\min}\leq h(t)\leq h_{\max}\wedge q(t)\geq q_{\min};\\ -\delta, & h(t)>h_{\max}\vee q(t)<q_{\min},\end{cases} \quad (7)$$

где $h_{\min}$ и $h_{\max}$ задают границы целевого диапазона ЧСС, $q_{\min}$ – минимально допустимый уровень качества выполнения; δ – шаг изменения сложности. В программной реализации значение δ может зависеть от длительности нахождения в соответствующем состоянии: чем дольше частота сердечных сокращений остается ниже целевого диапазона при высокой точности, тем более обоснованным становится постепенное повышение сложности.

Для исключения резких изменений применяется сглаживание управляющего воздействия. Пусть $u(t+1)$ – предварительно рассчитанный вектор параметров сцены. Тогда фактический вектор управления определяется выражением

$$u(t+1)=\alpha\,u(t)+(1-\alpha)\hat{u}(t+1), \quad \alpha\in[0,1]. \quad (8)$$

При значениях α, близких к единице, изменения сцены становятся более плавными, но реакция системы замедляется. При малых значениях α адаптация происходит быстрее, однако возрастает риск некомфортных скачков сложности. Поэтому параметр α выбирается с учетом частоты обновления сцены и характера двигательного задания.

Дополнительно вводится ограничение на скорость изменения каждого управляемого параметра

$$|\,u_i(t+1)-u_i(t)\,|\leq\Delta u_i^{\max}. \quad (9)$$

Это ограничение особенно важно для VR-среды, где резкое изменение скорости объектов может вызвать дискомфорт и ухудшить точность движения. В программной реализации ограничиваются не только физически значимые параметры, но и визуальные эффекты, поскольку чрезмерно резкая индикация также может отвлекать пользователя от двигательной задачи.

Алгоритм работы модуля включает последовательное выполнение следующих действий. Сначала система получает новые значения физиологических и двигательных параметров. Затем выполняются сглаживание и проверка допустимости данных. После этого блок оценки состояния определяет, находится ли пользователь в целевом режиме. Контроллер адаптации рассчитывает изменение уровня сложности и преобразует его в конкретные параметры сцены. На последнем этапе обновленные параметры передаются в VR-сцену, а все события записываются в журнал сеанса.

Важной особенностью алгоритма является совместный учет физиологической нагрузки и результативности. Если пользователь находится ниже целевой зоны пульса, но часто допускает ошибки, система не повышает сложность. Если пользователь находится в целевой зоне, но серия успешных действий резко прерывается, модуль может временно зафиксировать текущий уровень или уменьшить сложность. Если пользователь стабильно выполняет задание и не выходит за пределы допустимой нагрузки, система допускает постепенное усложнение сценария.

В реализованном сценарии общая формальная схема конкретизирована правилами дискретного изменения скорости:

– если счетчик серии успешных действий сбрасывается до единицы пять раз в течение одной минуты, скорость движения платформ уменьшается на 20 %;

– если длина серии достигает 20 действий, а ЧСС остается ниже заданного диапазона, скорость увеличивается на 20 %, но не превышает установленную специалистом верхнюю границу;

– при превышении верхней границы ЧСС запускается процедура экстренной остановки.

Такие правила обеспечивают понятную и проверяемую связь между состоянием пользователя и управляющим воздействием.

Программная реализация модуля

Программный модуль построен по компонентному принципу и включает средства приема физиологических и двигательных данных, оценки состояния пользователя, адаптации параметров сцены, визуальной обратной связи и журналирования. Такое построение позволяет изменять отдельные компоненты без переработки общей логики системы [18].

Блок приема данных биологической обратной связи получает значения ЧСС, проверяет их допустимость и передает в контроллер адаптации. Параметры тренировки задаются специалистом через web-интерфейс. В нем указываются целевой диапазон пульса, верхняя граница ЧСС, скорость на этапе калибровки и максимально допустимая скорость. После завершения настройки запускается тренировочный сеанс.

Блок двигательных событий получает данные о положении и ориентации стоп, скорости движения и взаимодействии с целевыми платформами. Для оценки качества выполнения используются расстояние до центра платформы и угол поворота стопы. При корректном наступании увеличиваются счет и серия успешных действий, а при промахе или недостаточной точности серия сбрасывается. Эти показатели передаются в контроллер адаптации.

Контроллер адаптации реализован независимо от конкретных объектов сцены. Он получает текущее состояние пользователя, целевые значения и параметры предыдущего шага, после чего формирует управляющую команду. Блок управления сценой преобразует ее в изменения скорости платформ, частоты появления целей, допустимой области попадания и параметров визуальной индикации. Обновленные значения применяются в Unity через программные компоненты сцены.

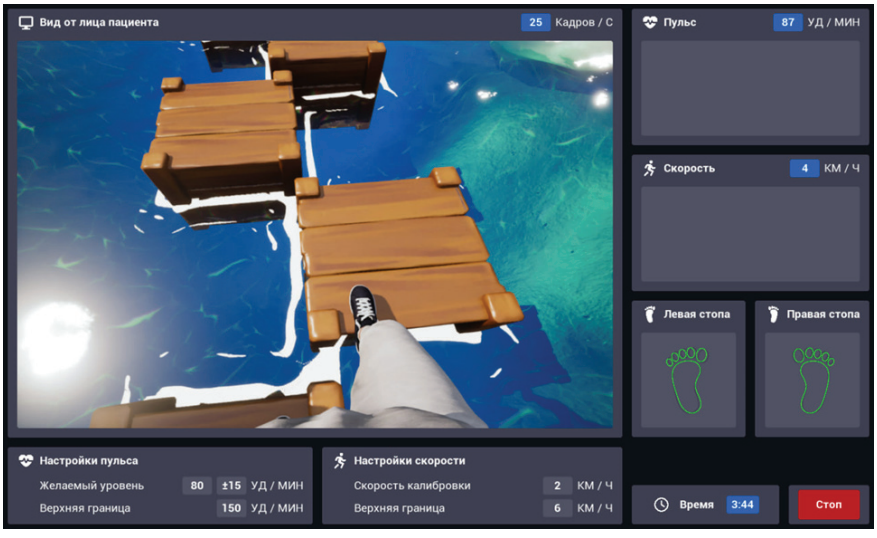


Рис. 1. WEB-интерфейс настройки и контроля тренировочного сеанса

Интерфейс пользователя содержит индикаторы ЧСС, скорости движения, счета и серии успешных действий. Отдельный web-интерфейс предназначен для специалиста и используется для настройки сеанса и текущего контроля показателей. Внешний вид интерфейса специалиста представлен на рис. 1.

После завершения тренировки события, параметры и результаты сохраняются в базе данных.

Индивидуальная калибровка и порядок проведения тренировки

Перед основным сеансом выполняется индивидуальная калибровка. Она необходима, поскольку зависимость между скоростью двигательного задания и ЧСС различается у разных пользователей и не является строго линейной. На этапе калибровки регистрируются фактические значения физиологического показателя при нескольких заданных режимах скорости [19].

В результате программной реализации создан интерактивный VR-сценарий в Unity, в котором пользователь от первого лица выполняет последовательные наступания на движущиеся целевые платформы. Виртуальная среда выполнена в виде природной локации с водной поверхностью, водопадами и каменными объектами. Сценарий объединяет двигательную задачу, регистрацию биологического сигнала и игровую обратную связь.

Целевые платформы формируют последовательность двигательных действий. Для каждого наступания оцениваются положение стопы относительно центра платформы и угол ее поворота. При корректном выполнении увеличиваются общий счет и серия успешных действий. При пропуске или недостаточной точности серия прерывается, а событие используется контроллером при выборе следующего уровня сложности.

Интерфейс пользователя содержит индикаторы ЧСС, скорости движения, счета и серии успешных действий. Эти элементы предназначены для оперативного информирования и формирования понятной мотивационной обратной связи. Поскольку влияние интерфейса на внимание и мотивацию в настоящей версии работы отдельно не измерялось, соответствующие эффекты рассматриваются как проектное назначение, а не как экспериментально подтвержденный результат.

Результаты

Реализованный демонстрационный VR-сценарий

В результате программной реализации создан интерактивный VR-сценарий, в котором пользователь последовательно наступает на движущиеся целевые платформы. В виртуальной среде отображаются ЧСС, скорость движения, общий счет и текущая серия успешных действий. Общий вид разработанного сценария представлен на рис. 2.

В представленном сценарии автоматически изменяется скорость движения платформ; дополнительно архитектура допускает изменение частоты их появления, размера целевой зоны и правил начисления результата. Управление ограничено заданными специалистом минимальными и максимальными значениями. При ухудшении выполнения скорость уменьшается, при устойчивой серии и недостаточной физиологической нагрузке – увеличивается, а при превышении верхней границы пульса выполняется экстренная остановка.

Выполнение двигательного задания от первого лица показано на рис. 3.

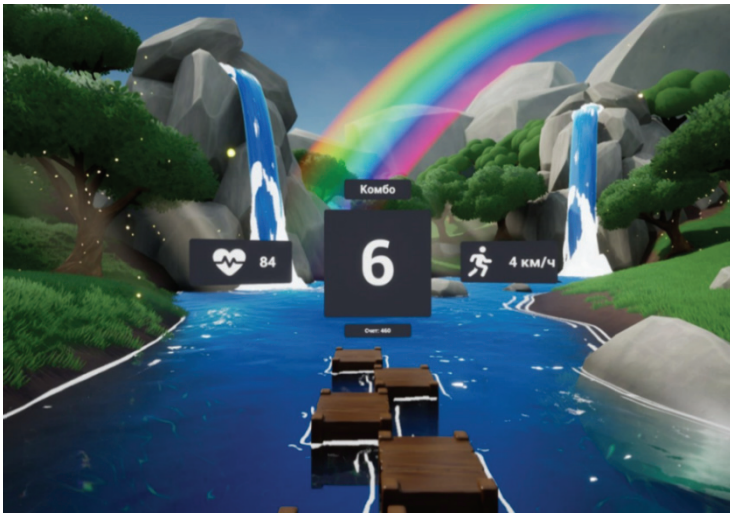


Рис. 2. Общий вид виртуальной сцены



Рис. 3. Выполнение двигательного задание от первого лица

Техническая проверка входного двигательного канала

Для проверки пригодности двигательных данных выполнено сопоставление скорости, восстановленной по измерениям IMU, с данными эталонного VR-трекера. Пользователь выполнял имитацию ходьбы и линейные перемещения на всенаправленной платформе. Одновременно регистрировались линейные ускорения датчиков и координаты трекера. После фильтрации ускорения интегрировались методом трапеций, а скорость трекера вычислялась как разностная производная координат. Качество совпадения оценивалось по средней абсолютной ошибке, среднеквадратичной ошибке и коэффициенту корреляции Пирсона [16]. Результаты сопоставления скорости, рассчитанной по данным IMU, с показаниями эталонного VR-трекера представлены в табл. 1.

Полученные значения показывают согласованность профилей скорости, рассчитанных по данным инерциальной системы и эталонного трекера. Оба источника данных корректно отражали участки ускорения, замедления и изменения темпа движения.

Таблица 1

Сравнение скорости IMU и эталонного трекера

Направление движения	MAE, м/с	RMSE, м/с	Коэффициент корреляции
Поперечное	0,11	0,15	0,81
Продольное	0,26	0,32	0,79

Отдельная проверка пространственной ориентации при контролируемых поворотах показала, что в статических положениях значения крена и тангажа отклонялись от нулевого положения не более чем на один-два градуса, а изменение курса происходило плавно и соответствовало поворотам пользователя. Обработанные данные передавались в Unity и использовались для обновления положения и ориентации виртуального аватара.

Обсуждение

Сравнение предлагаемого подхода с современными решениями показывает, что адаптация VR-упражнений по ЧСС уже применялась для регулирования физической нагрузки. Поэтому использование пульса как управляющего сигнала само по себе не является новым. Отличие предлагаемого модуля состоит в том, что недостаточная физиологическая нагрузка не приводит к автоматическому повышению сложности, если одновременно ухудшается качество выполнения двигательного действия [11].

Регистрация точности движений и предоставление обратной связи в реальном времени также реализованы в современных VR-системах реабилитации. В рассматриваемом модуле данные о попаданиях, пропусках и серии успешных действий используются не только для информирования пользователя, но и включаются в контур автоматического управления параметрами сцены. Универсальные системы динамической сложности подтверждают целесообразность отделения контроллера от конкретного игрового сценария; предложенная компонентная архитектура следует этому принципу [4, 6, 10].

Таким образом, научно-техническое отличие работы заключается не в применении отдельного биосигнала, игровой обратной связи или динамической сложности, а в их совместном использовании в формализованном контроллере двигательного VR-задания. Потенциальными преимуществами являются предотвращение необоснованного усложнения при низком качестве движения, плавность управляющих воздействий и возможность объяснить причину каждого изменения параметров. Однако эти преимущества пока следуют из структуры метода и должны быть подтверждены количественным сравнением с фиксированным режимом и адаптацией только по ЧСС.

Заключение

Разработан программный модуль адаптации виртуальной среды с биологической обратной связью. Модуль получает частоту сердечных сокращений и двигательные данные, оценивает качество выполнения упражнения и изменяет скорость целевых платформ. В состав решения входят подсистемы приема и обработки данных, контроллер адаптации, VR-сцена в Unity, web-интерфейс специалиста и журналирование тренировочного сеанса.

Техническая проверка показала, что двигательные данные инерциальных датчиков согласуются с данными эталонного VR-трекера и могут использоваться

для управления сценой. Реализованы правила снижения скорости при повторяющихся ошибках, повышения скорости при устойчивом выполнении и недостаточной нагрузке, ограничения максимального значения и экстренной остановки при превышении верхней границы пульса.

Дальнейшая работа должна включать настройку и обоснование порогов адаптации, количественное сравнение фиксированного режима, адаптации только по частоте сердечных сокращений и предлагаемого совместного управления, а также оценку пользовательского комфорта. Перспективным является расширение набора входных сигналов за счет электромиографических и кинематических данных и разработка профилей адаптации для различных групп пользователей.

Разработанный модуль может использоваться как программная основа исследовательских и тренировочных VR-систем, в которых параметры упражнения изменяются по физиологическим и двигательным данным пользователя. До проведения экспериментальной и клинической проверки его применение следует ограничивать контролируемыми условиями, а допустимые диапазоны нагрузки и параметров сцены должны задаваться специалистом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№ *124032800018-5*).

Список литературы

1. Попов, А. И. Концептуальные подходы к формированию и оцениванию компетенций будущих специалистов в экстремальной деятельности / А. И. Попов, С. В. Карпушкин, А. Д. Обухов // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2020. – № 1(37). – С. 51–59.

2. Visualization technology and tool selection methods for solving adaptive training complex structural-parametric synthesis problems / M. N. Krasnyanskiy, D. L. Dedov, A. D. Obukhov, S. Y. Alekseev // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2020. – Vol. 20, No. 4. Art. 041001. doi: 10.1115/1.4045289

3. The Potential Effects of Sensor-Based Virtual Reality Telerehabilitation on Lower Limb Function in Patients with Chronic Stroke Facing the COVID-19 Pandemic: A Retrospective Case-Control Study / M. Bonanno, M. G. Maggio, P. De Pasquale [et al.] // Medical Sciences. – 2025. – Vol. 13, No. 2. – Art. 65. doi: 10.3390/medsci13020065

4. Technical Aspects of Virtual Augmented Reality-Based Rehabilitation Systems for Musculoskeletal Disorders of the Lower Limbs: A Systematic Review / S. Kiani, I. Rezaei, S. Abasi [et al.] // BMC Musculoskeletal Disorders. – 2023. – Vol. 24. – Art. 4. doi: 10.1186/s12891-022-06062-6

5. Extended Reality Biofeedback for Functional Upper Limb Weakness: Mixed Methods Usability Evaluation / A. Dutta, K. Hatjipanagioti, M. A. Newsham [et al.] // JMIR XR and Spatial Computing. – 2025. – Vol. 2. – Art. e68580. doi: 10.2196/68580

6. Effectiveness of Treadmill-Based Virtual-Reality Biofeedback Training to Improve Gait Function in Children and Adolescents with Congenital and Acquired Brain Injury / S. H. Schless, G. Sorek, I. Schurr [et al.] // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16. – Art. 2133. doi: 10.1038/s41598-025-31852-y

7. Design of Simulators for Automated Information Systems of Engineers' Training / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov, A. D. Obukhov // Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 14, No. 21. – P. 2674–2684. doi: 10.3923/jas.2014.2674.2684

8. Попов, А. И. Концептуальные подходы к автоматизированному управлению эффективностью профессионального образования / А. И. Попов, А. Д. Обухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 246–257. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.246-257

9. Организация взаимодействия с виртуальной реальностью на основе беговой платформы для комплексного обучения специалистов / А. Д. Обухов, Д. Л. Дедов, В. В. Вострикова [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 14–20. doi: 10.36622/VSTU. 2021.17.4.002

10. Upper and Lower Limb Training Evaluation System Based on Virtual Reality Technology / J. Zhao, H. Gao, C. Yang [et al.] // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 21. – Art. 6909. doi: 10.3390/s24216909

11. Dynamic Difficulty Adjustment in Virtual Reality Exergaming to Regulate Exertion Levels via Heart Rate Monitoring / L. Küntzer, M. Scherer, T. Mentler, G. Rock // Proceedings of the 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. – 2024. – P. 82:1–82:2. doi: 10.1145/3641825.3689504

12. Optimising Engagement for Stroke Rehabilitation Using Serious Games / J. W. Burke, M. D. J. McNeill, D. K. Charles [et al.] // The Visual Computer. – 2009. – Vol. 25, No. 12. – P. 1085–1099. doi: 10.1007/s00371-009-0387-4

13. Human motion capture algorithm for creating digital shadows of the movement process / A. D. Obukhov, A. A. Volkov, N. A. Vekhteva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – Art. 012033. doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012033

14. Machine Learning Based Abnormal Gait Classification with IMU Considering Joint Impairment / S. Hwang, J. Kim, S. Yang [et al.] //Sensors (Basel). – 2024. – Vol. 24, No. 17. – P. 5571. doi: 10.3390/s24175571

15. Yee David Vun Sing. Vision-Based Motion Capture for the Gait Analysis of Neurodegenerative Diseases: A Review / D. V. S. Yee, R. Bowers, A. McGarry // Gait & Posture. – 2024. – Vol. 112. – P. 95–107. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.04.029

16. Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation / A. Obukhov, A. Volkov, A. Pchelintsev [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 19. – Art. 8058. doi: 10.3390/s23198058

17. Modeling of the Learning Process in Adaptive Training Complexes / M. N. Krasnyanskiy, A. Obukhov, D. Dedov, A. Siukhin// Istrazivanja i Projektovanja za Privredu (Journal of Applied Engineering Science). – 2018. – Vol. 16, No. 4. – P. 487–493. doi: 10.5937/jaes16-17627

18. Разработка адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149–155. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.149-155

19. Modelling Individual Variation in Human Walking Gait Across Populations and Walking Conditions Via Gait Recognition / K. A. Duncanson F. Horst, E. Abbasnejad [et al.] // Journal of the Royal Society Interface. – 2024. – Vol. 21, No. 221. – Art. 20240565. doi: 10.1098/rsif.2024.0565

Software Module for Adapting a Virtual Environment with Biofeedback to Stimulate User Motor Activity

© A. E. Arkhipov[1] ✉, A. A. Bozhiy[1], V. S. Kruglov[2]

[1] *Department of Automated Decision Support Systems, alexeiarh@gmail.com; TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[2] *Department of Fundamental and Applied Research, TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: adaptive training system; biofeedback; virtual reality; motor activity; dynamic adaptation; software module; complexity management.

Abstract: A software module for adapting a virtual environment with biofeedback to stimulate user motor activity is presented. The adaptation method involves increasing, maintaining, or decreasing complexity, smoothing control inputs, and limiting changes to scene parameters. The module's input and output data are defined, and the software architecture is developed. The software implementation features a VR scenario involving sequential stepping onto target platforms. Rules were implemented to reduce speed upon repeated errors, increase speed during consistent performance with insufficient workload, limit maximum values, and trigger an emergency stop if the upper heart rate limit is exceeded. The module can serve as the software foundation for research and training VR systems where exercise parameters are adjusted based on the user's physiological and motor data.

References

1. Popov A.I., Karpushkin S.V., Obukhov A.D. [Conceptual approaches to the formation and assessment of competencies of future specialists in extreme activities], *Professional'noye obrazovaniye v Rossii i za rubezhom* [Professional Education in Russia and Abroad], 2020, no. 1(37), pp. 51-59. (In Russ., abstract in Eng.).

2. Krasnyanskiy M.N., Dedov D.L., Obukhov A.D., Alekseev S.Y. Visualization technology and tool selection methods for solving adaptive training complex structural-parametric synthesis problems, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, article 041001. doi: 10.1115/1.4045289

3. Bonanno M., Maggio M.G., De Pasquale P. [et al.] The Potential Effects of Sensor-Based Virtual Reality Telerehabilitation on Lower Limb Function in Patients with Chronic Stroke Facing the COVID-19 Pandemic: A Retrospective Case-Control Study, *Medical Sciences*, 2025, vol. 13, no. 2, art. 65. doi: 10.3390/medsci13020065

4. Kiani S., Rezaei I., Abasi S. [et al.] Technical Aspects of Virtual Augmented Reality-Based Rehabilitation Systems for Musculoskeletal Disorders of the Lower Limbs: A Systematic Review, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2023, vol. 24, article 4. doi: 10.1186/s12891-022-06062-6

5. Dutta A., Hatjipanagioti K., Newsham M.A. [et al.] Extended Reality Biofeedback for Functional Upper Limb Weakness: Mixed Methods Usability Evaluation, *JMIR XR and Spatial Computing*, 2025, vol. 2, article e68580. doi: 10.2196/68580

6. Schless S.H., Sorek G., Schurr I. [et al.] Effectiveness of treadmill-based virtual-reality biofeedback training to improve gait function in children and adolescents with congenital and acquired brain injury, *Scientific Reports*, 2026, vol. 16, article 2133. doi: 10.1038/s41598-025-31852-y

7. Krasnyanskiy M.N., Ostroukh A.V., Karpushkin S.V., Dedov D.L., Obukhov A.D. Design of Simulators for Automated Information Systems of Engineers' Training,

Journal of Applied Sciences, 2014, vol. 14, no. 21, pp. 2674-2684. doi: 10.3923/jas.2014.2674.2684

8. Popov A. I., Obukhov A. D. Conceptual approaches to automated management of professional education efficiency, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 246-257. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.246-257. (In Russ., abstract in Eng.).

9. Obukhov A.D., Dedov D.L., Vostrikova V.V. [et al.] Organization of interaction with virtual reality based on a treadmill platform for integrated specialist training, *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 14-20. doi: 10.36622/VSTU.2021.17.4.002. (In Russ., abstract in Eng.).

10. Zhao J., Gao H., Yang C. [et al.] Upper and Lower Limb Training Evaluation System Based on Virtual Reality Technology, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 21, article 6909. doi: 10.3390/s24216909

11. Küntzer L., Scherer M., Mentler T., Rock G. Dynamic Difficulty Adjustment in Virtual Reality Exergaming to Regulate Exertion Levels via Heart Rate Monitoring, *Proceedings of the 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2024, pp. 82:1-82:2. doi: 10.1145/3641825.3689504

12. Burke J.W., McNeill M.D.J., Charles D.K. [et al.] Optimising Engagement for Stroke Rehabilitation Using Serious Games, *The Visual Computer*, 2009, vol. 25, no. 12, pp. 1085-1099. doi: 10.1007/s00371-009-0387-4

13. Obukhov A.D., Volkov A.A., Vekhteva N.A. [et al.] Human motion capture algorithm for creating digital shadows of the movement process, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2388, no. 1, art. 012033. doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012033

14. Hwang S.,Kim J., Yang S. [et al.] Machine Learning Based Abnormal Gait Classification with IMU Considering Joint Impairment, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 17, article 5571. doi: 10.3390/s24175571

15. Yee D.V.S., Bowers R., McGarry A. Vision-Based Motion Capture for the Gait Analysis of Neurodegenerative Diseases: A Review, *Gait & Posture*, 2024, vol. 112, pp. 95-107. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.04.029

16. Obukhov A., VolkovA., Pchelintsev A. [et al.] Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 19, article 8058. doi: 10.3390/s23198058

17. Krasnyanskiy M., Obukhov A., Dedov D.,Siukhinet A. Modeling of the Learning Process in Adaptive Training Complexes, *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 487-493. doi: 10.5937/jaes16-17627

18. Krasnyanskiy M.N., Dedov D.L., Obukhov A.D., Arkhipov A.E. [Development of adaptive professional training systems for modeling fire propagation], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2017, no. 3(65), pp. 149-155. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.149-155 (In Russ., abstract in Eng.).

19. Duncanson K.A., Horst F., Abbasnejad E. [et al.] Modelling Individual Variation in Human Walking Gait Across Populations and Walking Conditions Via Gait Recognition, *Journal of The Royal Society Interface*, 2024, vol. 21, no. 221, article 20240565. doi: 10.1098/rsif.2024.0565

Softwaremodul zur Anpassung einer virtuellen Umgebung mit Biofeedback zur Stimulierung der motorischen Aktivität des Benutzers

Zusammenfassung: Es ist ein Softwaremodul zur Anpassung einer virtuellen Umgebung mit Biofeedback zur Stimulierung der motorischen Aktivität des Nutzers vorgestellt. Die Anpassungsmethode umfasst die Erhöhung, Beibehaltung oder

Verringerung der Komplexität, die Glättung der Steuerungsaktion und die Begrenzung von Änderungen der Szenenparameter. Die Eingangs- und Ausgangsdaten des Moduls sind definiert und die Softwarearchitektur entwickelt. Die Softwareimplementierung ist durch ein VR-Szenario mit sequenziellen Schritten auf Zielplattformen dargestellt. Es sind Regeln implementiert, um die Geschwindigkeit bei wiederholten Fehlern zu reduzieren, sie bei stabiler Leistung und unzureichender Belastung zu erhöhen, den Maximalwert zu begrenzen und einen Notstopp auszulösen, wenn die obere Herzfrequenzgrenze überschritten wird. Das Modul kann als Softwaregrundlage für Forschungs- und Trainings-VR-Systeme verwendet werden, in denen die Übungsparameter basierend auf den physiologischen und motorischen Daten des Nutzers verändert werden.

Module programmatique d'adaptation d'un environement virtuel affectionné à la feedback biologique pour stimuler l'activité motrise de l'usageur

Résumé: Est présenté un module programmatique de l'adaptation d'un environnement virtuel afféquent à la feedback biologique pour stimuler l'activité motrice de l'utilisateur. La méthode d'adaptation prévoit l'augmentation, le maintien ou la réduction de la complexité, l'assouplissement de l'effet de la commande et la limitation des changements des paramètres de scène. Est définie la composition des données entrées et sorties du module. Est développée l'architecture du logiciel. Est présentée la mise en œuvre programmatique sous forme d'un scénario VR avec un passage séquentiel sur les plateformes cibles. Sont réalisées des règles pour réduire la vitesse en cas d'erreurs répétées, pour augmenter la vitesse lors d'une exécution stable et d'une charge insuffisante, pour limiter la valeur maximale et arrêter d'urgence en cas de dépassement de la limite supérieure du rythme. Il est noté que le module peut servir de base logicielle aux systèmes VR de recherche et d'entraînement, dans lesquels les paramètres de l'exercice sont ajustés en fonction des données physiologiques et motrices de l'utilisateur.

Авторы: ***Архипов Алексей Евгеньевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; ***Божий Алина Адриановна*** – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; ***Круглов Владислав Сергеевич*** – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», программист, Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 004.81: 678.58
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.424-435

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ КИНЕТИКИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

© А. А. Маслов[1] ✉, С. Г. Тихомиров[1], О. В. Карманова[2], И. А. Хаустов[1], Е. Е. Титова[1]

[1] *Кафедра информационных и управляющих систем, imasslove@mail.ru;*
[2] *кафедра технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Российская Федерация*

Ключевые слова: изотермическая вулканизация; кинетическая модель; математическое моделирование; реометрия.

Аннотация: Представлен сравнительный анализ кинетических моделей изотермической вулканизации резиновой смеси на основе физически-информированных нейронных сетей. Рассмотрена модель Камала и расширенная кинетическая модель Корана, описываемая системой дифференциальных уравнений. Обе модели реализованы в рамках единой архитектуры физически-информированной нейронной сети и обучены на экспериментальных реометрических данных, представляющих зависимость крутящего момента от времени, при температурах 145, 155 и 165 °С. Проведен анализ нейронной сети, используя каждую из кинетических моделей. Показано, что расширенная модель Корана обеспечивает более высокую точность по показателям среднего абсолютного отклонения и среднеквадратичного отклонения по сравнению с моделью Камала. Полученные результаты подтверждают эффективность применения физически-информированной нейронной сети для определения параметров кинетических моделей вулканизации и могут быть использованы при расчете режимов вулканизации толстостенных резинотехнических изделий.

Обозначения

$C_A, C_B, C_{B*}, C_{\mathrm{vu_{St}}}, C_{\mathrm{vu_{Lab}}}, C_C, C_{R*}, C_R$ – концентрации ДАВ, предшественника сшивания; активной формы предшественника сшивания; стабильных вулканизационных узлов; лабильных вулканизационных узлов; внутримолекулярно связанной серы; макрорадикала каучука; каучука, моль/кг;

C_{vu} – суммарная концентрация элементов сетки;

$k_1, \ldots, k_9$ – константы скоростей реакций, $\mathrm{с}^{-1}$ (k_4, кг·$\mathrm{с}^{-1}$/моль);

$k_{\mathrm{м}}$ – коэффициент масштабирования;

L – функция потерь;

L_{data} – ошибка аппроксимации экспериментальных данных;

L_{IC} – ошибка по начальным условиям;

L_{ODE} – оценка невязок по отклонению скорости вулканизации;

L_{range} – штраф за выход допустимых значений;

m, n – эмпирические показатели порядка реакции;

T – температура, °С;

W_{data}, W_{ODE}, W_{IC}, W_{range} – весовые коэффициенты функции потерь;

α_1 – степень вулканизации, усл. ед.;

α, β, γ, δ – стехиометрические коэффициенты.

Введение

Вулканизация является одним из ключевых этапов формирования эксплуатационных свойств резинотехнических изделий, таких как автомобильные шины, определяя прочность, эластичность и долговечность готовых изделий. Современные требования к ресурсосбережению и энергоэффективности производства стимулируют развитие расчетных методов прогнозирования свойств и создание математических моделей, позволяющих заранее оценивать влияние рецептуры и режимов вулканизации на свойства готовых изделий. При этом наибольший интерес представляют модели, которые учитывают как термодинамику, так и кинетику химических превращений, происходящих в процессе формирования пространственной сетки вулканизатов [1]. Классические подходы к моделированию часто опираются на упрощенные кинетические схемы и используются в виде эмпирических зависимостей, определяемых по данным реометрии или дифференциальной сканирующей калориметрии [2]. В результате литературного обзора выявлена одна из наиболее распространенных моделей вулканизации – модель Камала, которая описывает изменение степени вулканизации во времени с использованием кинетического уравнения с небольшим числом параметров [2]. Согласно данным современных исследований [2 – 4] показана недостаточная эффективность применения традиционных подходов к математическому моделированию вулканизационных процессов, происходящих при переработке сложных по составу изделий, полученных на основе многокомпонентных резиновых смесей, где наблюдаются значительные градиенты температур.

Для решения этой проблемы и интенсификации процесса вулканизации наиболее перспективным и актуальным инструментом признаются физически-информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks – PINN) [3, 4], способность которых интегрировать физические законы и учитывать многостадийную природу реакции делает их ключевым элементом в разработке кинетических моделей повышенной точности, что подтверждается рядом недавних публикаций в области полимерной инженерии [3 – 5].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности расчета режимов вулканизации, особенно для крупногабаритных и армированных изделий [6 – 8]. В таких изделиях из-за низкой теплопроводности возможно неравномерное распределение температуры по объему, что может приводить к локальному перегреву материала или, наоборот, к недостаточной степени вулканизации в отдельных зонах. Это ухудшает механические свойства изделий и снижает их эксплуатационную надежность. Классические подходы к идентификации кинетических параметров, базирующиеся на аппроксимации реометрических данных методами локальной оптимизации, характеризуются проблемой многовариантности решения [3]. Существует вероятность получения множества различных наборов параметров, обеспечивающих равнозначную точность описания эксперимента, при этом результат поиска критически зависит от выбранных начальных условий.

Развитие методов машинного обучения открывает возможность интеграции априорных физических знаний о процессе вулканизации непосредственно в структуру моделей [4]. Физически-информированные нейронные сети позволяют в общем случае оценивать эмпирические параметры детерминированных математических моделей, описывающих физико-химические процессы на основе дифференциальных уравнений различной сложности. Применительно к процессам вулканизации речь идет об оценке кинетических параметров вулканизации и получении устойчивых решений при ограниченном объеме экспериментальных данных. Применение PINN к моделям изотермической вулканизации является перспективным направлением, особенно при сравнении альтернативных кинетических схем.

Цель работы – сравнительный анализ точности кинетических моделей изотермической вулканизации резиновой смеси на базе архитектуры физически-информированной нейронной сети для определения степени структурирования резиновых изделий. Для достижения цели проводятся оценка качества аппроксимации экспериментальных данных моделью Камала и расширенной моделью на основе общепризнанной схемы Корана, а также анализ влияния структуры кинетической модели на точность описания степени вулканизации.

Описание исследуемых моделей

Математическая модель Камала (1), показывающая изменение степени структурирования $\alpha_1(t)$ как результат конкурирующих процессов сшивания молекул, представлена дифференциальным уравнением первого порядка с параметрами, зависящими от температуры:

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = kk_1(1-\alpha_1)^m + kk_2\alpha_1^n . \quad (1)$$

Температурная зависимость констант реализуется по закону Аррениуса, что позволяет использовать модель при разных режимах изотермической вулканизации [2].

При определении параметров модель Камала фактически описывает макрокинетику формирования сетки без выделения промежуточных стадий, таких как образование активированных связей, промежуточных радикалов и продуктов деструкции. Это упрощает процедуру подбора параметров, но ограничивает возможности экстраполяции модели на существенно отличающиеся режимы и рецептурные варианты [2].

Модернизированная схема Корана включает дополнительные реакции, приводящие к модификации молекул серы, образованию макрорадикала и его реакцию с действительным агентом вулканизации (**ДАВ**) [1]. Математическая модель представлена системой дифференциальных уравнений (2), описывающих кинетику процесса, дополненную начальными условиями для концентраций основных реагентов и промежуточных соединений. Модель показывает изменение концентраций исходных связей каучука, серосодержащих структур, активных центров, промежуточной вулканизационной сетки и продуктов реакции [6 – 8].

Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{dC_A}{dt} = -k_1C_A - k_4C_AC_{B*};\\
&\frac{dC_B}{dt} = k_1C_A - k_2C_B + \beta k_4C_AC_{B*} + k_9C_{R*};\\
&\frac{dC_{B*}}{dt} = k_2C_B - \left(k_3 + k_5 + k_7\right)C_{B*} + k_6C_{\mathrm{vu_{Lab}}} - k_4C_AC_{B*};\\
&\frac{dC_{\mathrm{vu_{St}}}}{dt} = \alpha k_3C_{B*};\\
&\frac{dC_{\mathrm{vu_{Lab}}}}{dt} = \gamma k_5C_{B*} - k_6C_{\mathrm{vu_{Lab}}};\\
&\frac{dC_C}{dt} = \delta k_7C_{B*}; \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\frac{dC_{R*}}{dt} = k_8 C_R - k_9 C_{R*};$$

$$\frac{dC_R}{dt} = -k_8 C_R;$$

$$C_A(0) = \xi\,[S_8]\cdot[A_C]\cdot[\mathrm{Akt}]^{\theta}\cdot[C_R(0)]^{\eta};$$

$$C_B(0) = 0;$$

$$C_{B*}(0) = 0;$$

$$C_{\mathrm{vu_{St}}}(0) = 0;$$

$$C_{\mathrm{vu_{Lab}}}(0) = 0;$$

$$C_C(0) = 0;$$

$$C_{R*}(0) = C_R(0)^{\eta}.$$

Начальная концентрация ДАВ определяется произведением

$$[\text{ДАВ}] = \xi\,[S_8]\cdot[A_C]\cdot[\mathrm{Akt}]^{\theta}\cdot[R]^{\eta}, \tag{3}$$

где ξ, θ, η – константы; $[\mathrm{Akt}]^{\theta}$, $[S_8]$, $[R]^{\eta}$, $[A_C]$ – начальные концентрации активатора (оксида цинка), серы, макрорадикала каучука и ускорителя соответственно.

Степень вулканизации определяется по формуле

$$\alpha_1 = k_{\text{м}} C_{\text{vu}}\,, \tag{4}$$

где C_{vu} – суммарная концентрация элементов сетки ($C_{\text{vuSt}} + C_{\text{vuLab}}$); $k_{\text{м}}$ – коэффициент масштабирования, обеспечивающий приведение значения C_{vu} к диапазону изменения степени вулканизации.

Описание физически-информированной нейронной сети

В рассматриваемой работе физически-информированная нейронная сеть (*англ*. Physics-Informed Neural Network (**PINN**)) строится как многослойный персептрон, включающий входной слой, два скрытых слоя по 64 нейрона и выходной слой (рис. 1). Нейронная сеть принимает на вход время и на выходе предсказывает степень вулканизации $\alpha_1(t)$.

В скрытых слоях нейронной сети в качестве функции активации используется гиперболический тангенс th. Выбор данной функции обусловлен ее гладкостью и непрерывной дифференцируемостью, что является принципиально важным при использовании физико-информированных нейронных сетей, основанных на вычислении производных выходной величины по входной переменной. Функция th обеспечивает устойчивую аппроксимацию нелинейных зависимостей и позволяет корректно вычислять производные с помощью автоматического дифференцирования, что применяется при расчете функции потерь в PINN. Кроме того, использование th способствует более стабильному процессу обучения по сравнению с кусочно-линейными функциями активации. В выходном слое используется сигмоидальная функция активации, обеспечивающая ограничение значений степени вулканизации в диапазоне от 0 до 1, что соответствует физическому смыслу рассматриваемой величины.

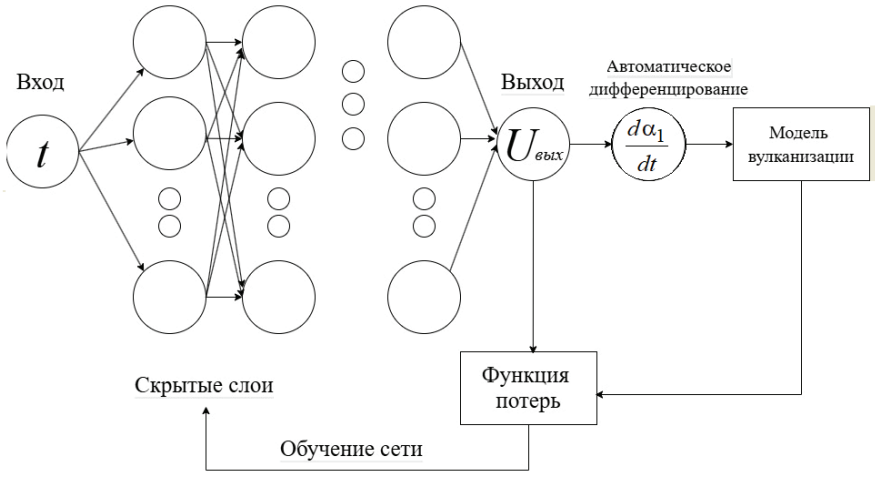


Рис. 1. Архитектура PINN для расчета степени завершенности вулканизации при изотермических условиях

Ключевой особенностью метода является формирование функции потерь [3 – 5, 9], включающей несколько слагаемых (5). В рассматриваемой постановке использовались:

– ошибка аппроксимации экспериментальных данных L_{data};

– оценка невязок по отклонению скорости вулканизации L_{ODE}, вычисляемая через автоматическое дифференцирование по времени;

– ошибка по начальным условиям L_{IC};

– дополнительный штраф L_{range}, ограничивающий значения степеней и концентраций физически допустимыми интервалами.

Итоговая функция потерь имеет вид

$$L = W_{\text{data}} \cdot L_{\text{data}} + W_{\text{ODE}} \cdot L_{\text{ODE}} + W_{\text{IC}} \cdot L_{\text{IC}} + W_{\text{range}} \cdot L_{\text{range}}, \quad (5)$$

здесь весовые коэффициенты подобраны раздельно для каждого температурного режима.

Настройки для обучения нейросетевых моделей подбирались с учетом различий в скорости протекания реакции при разных температурах. Для моделей использовались следующие параметры нейронной сети (табл. 1).

Число эпох обучения определяет количество итераций, в ходе которых нейронная сеть последовательно уточняет параметры модели. В процессе каждой эпохи выполняется полный проход по обучающим данным с вычислением функции потерь и обновлением параметров. Различие в числе эпох обучения обусловлено особенностями формы экспериментальных зависимостей. Несмотря на более высокую температуру 165 °С, соответствующая кривая характеризуется быстрым выходом на насыщение и сравнительно простой формой, что облегчает ее аппроксимацию.

Таблица 1

Параметры обучения нейронной сети

Параметр PINN	Число эпох	W_{data}	W_{ODE}	W_{IC}	W_{range}
145 °С	20000	1000	1,0	10	10
155 °С	40000	3000	0,5	10	10
165 °С	20000	1000	1,0	10	10

В то же время для температуры 155 °С зависимость степени вулканизации от времени имеет более протяженный переходный участок и выраженную S-образную форму, что усложняет задачу аппроксимации и требует увеличения числа эпох обучения для достижения требуемой точности.

Весовые коэффициенты определяют относительную значимость различных слагаемых функции потерь при обучении нейронной сети. Их подбор позволяет обеспечить высокую точность аппроксимации экспериментальных данных, сохранив физическую сущность модели аппроксимации.

Согласно анализу параметров обучения видно, что для температуры 155 °С использованы увеличенные значения весового коэффициента, соответствующего аппроксимации экспериментальных данных, и уменьшенное значение коэффициента при оценке невязок скоростей. Это связано с тем, что при данной температуре наблюдается более сложная форма кинетической кривой, включающая протяженный переходный участок, что затрудняет ее точное описание с использованием только физической модели. В связи с этим при обучении нейронной сети больший приоритет отдан согласованию с экспериментальными данными, что потребовало увеличения числа эпох обучения и обеспечило высокую точность совпадения расчетных и измеренных зависимостей. При этом слагаемое, связанное с оценкой невязок скоростей реакций, обеспечивает соблюдение физической сущности модели процесса, а дополнительные члены функции потерь позволяют использовать при аппроксимации корректные начальные условия и ограничивать значения переменных в физически допустимых пределах. Для температур 145 и 165 °С форма зависимостей относительно проста, что позволяет использовать меньшее число эпох.

Ключевой особенностью предложенного подхода является вариативность блока функции потерь – выход нейронной сети формируется на основе физической модели вулканизации, где в данном случае это либо модель Корана, условно назовем «модель № 1», либо модель Камала – «модель № 2», что позволяет адаптировать PINN под различные уровни детализации кинетики. В модели № 2 используется одно дифференциальное уравнение, что дает меньшую размерность по сравнению с моделью № 1. При этом обучение обеих конфигураций осуществлялось при использовании одинаковой интервальной сетки дискретизации по времени экспериментальных данных, что обеспечивает строгую сопоставимость результатов и минимизирует влияние погрешностей численного расчета.

Численные эксперименты реализованы на языке Python с использованием библиотек PyTorch, NumPy и Matplotlib для обучения и визуализации результатов [9]. Для каждой температуры выполнялся цикл обучения моделей № 1 и № 2, после чего вычислялись прогнозные значения $\alpha_1(t)$ и оценивались метрики качества.

Экспериментальные данные

В качестве натурного эксперимента использована резиновая смесь на основе каучуковых композиций, применяемых в протекторных слоях шин. В состав смеси входят натуральный и синтетический каучуки, технический углерод, пластификатор, сера и ускорители вулканизации. Испытания смеси проводили на реометре в изотермических условиях для определения ее вулканизационных свойств. В ходе эксперимента регистрировалась зависимость крутящего момента от времени при температурах 145, 155 и 165 °С.

Приведем состав резиновой смеси, масс. ч.:

Синтетический каучук …….	100
Технический углерод ……	30
Мягчитель ……..	15
Сера техническая ……	2
Стеариновая кислота ……...	2
Оксид цинка ……	2

Полученные реометрические кривые нормированы и преобразованы в степень вулканизации $\alpha_1(t)$. Нормализация выполнялась линейным масштабированием по минимальному и максимальному значениям крутящего момента, что обеспечило сопоставимость результатов при различных температурах.

На рисунке 2 представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных с использованием физически-информированной нейронной сети для исследуемых моделей. Графики позволяют отдельно оценить качество описания процесса каждой из рассматриваемых моделей. Также показано их совместное сравнение с экспериментальными данными, что дает возможность наглядно сопоставить точность моделей на различных стадиях вулканизации.

Полученные графики демонстрируют высокую степень совпадения расчетных и экспериментальных данных на всем интервале времени. Модернизированная модель Корана корректно воспроизводит как начальный участок процесса, так и стадию интенсивного роста и выход на плато вулканизации. Благодаря учету в модели № 1 многостадийности и большему количеству параметров, она эффективнее адаптируется к различным этапам вулканизации.

В результате обучения нейронной сети получены параметры математической модели № 1 (табл. 2).

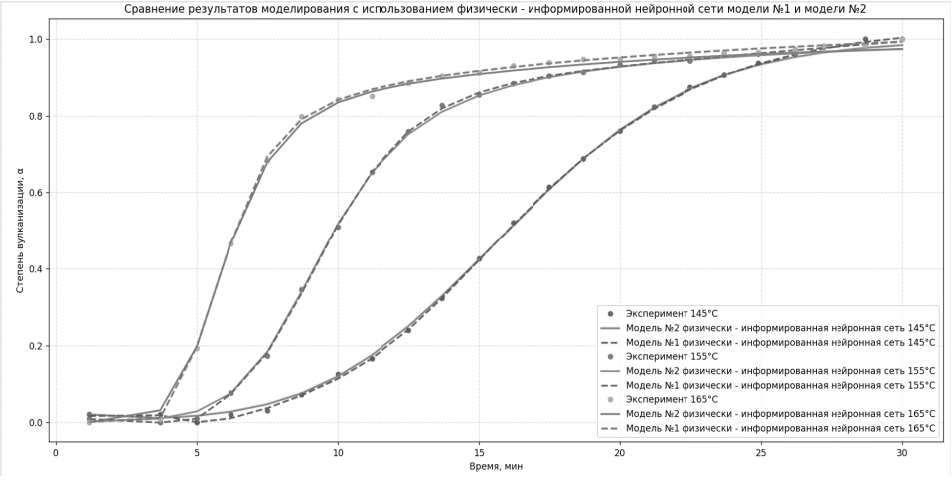


Рис. 2. Результаты расчетов степени вулканизации с использованием PINN

Таблица 2

Результаты идентификации параметров модели № 1

T, °C	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
145	0,0084	0,2419	0,5680	0,0979	1,3674	0,6046	0,5680
155	$1{,}12\cdot10^{-4}$	$8{,}05\cdot10^{-3}$	$3{,}76\cdot10^{-1}$	$1{,}56\cdot10^{-2}$	1,0475	$4{,}86\cdot10^{-1}$	$3{,}75\cdot10^{-1}$
165	0,0090	0,2798	0,6020	0,1380	1,4736	0,5186	0,6020
T, °C	k_8	k_9	α	β	γ	δ	$k_м$
145	0,0068	0,0492	0,0016	0,9176	1,8345	0,007	0,955
155	$7{,}27\cdot10^{-4}$	$6{,}73\cdot10^{-4}$	–0,0007	1,5256	1,7142	–0,003	0,931
165	0,0290	0,1694	0,0201	–0,3792	1,8498	0,002	0,942

Таблица 3

Результаты идентификации параметров модели №2

T, °C	kk_1	kk_2	m	n
145	0,1788	0,1726	3,0243	3,3152
155	0,1734	0,1665	2,2065	4,9603
165	0,2026	0,1701	1,9865	7,0386

Анализ полученных зависимостей показывает, что модели в сочетании с физически-информированной нейронной сетью корректно воспроизводят общий характер изменения степени вулканизации, соответствующий сигмоидальной форме кривых. Результаты идентификации параметров модели Камала приведены в табл. 3.

В целом следует отметить, что модель Камала обеспечивает корректное качественное описание кинетики вулканизации, однако ее ограниченная структура не позволяет в полной мере учитывать особенности начального индукционного периода и плато вулканизации, что проявляется в локальных отклонениях от экспериментальных данных.

Анализируя функцию потерь PINN, включающую кинетическую модель процесса, выявлены следующие характеристики: модель Камала имеет обобщенную кинетику, состоит из одного уравнения; нет связи с геометрией, только связь степени завершенности от времени; параметры модели – эмпирические показатели формы кривой, набор параметров хорошо описывает экспериментальную кинетику и позволяет прогнозировать поведение при других температурах или режимах, но это «параметры модели», а не «чистые химические константы»; модель не учитывает теплоперенос, изменения температурных градиентов по толщине изделий. Модернизированная модель Корана представлена термокинетической моделью расчета концентраций реагентов реакции вулканизации, состоит из 8 дифференциальных уравнений, начальные условия представлены начальными концентрациями компонентов смеси; степень вулканизации определяется как функция времени. В каждой из исследуемых моделей учитывается температура процесса в виде констант скоростей химических реакций, описываемых уравнением Аррениуса.

Таким образом, использование модернизированной модели позволяет повысить точность описания процесса вулканизации на всех стадиях, что особенно важно при анализе начального периода и перехода к насыщению. Это подтверждает эффективность применения физико-информированных нейронных сетей для определения параметров более сложных кинетических моделей.

Количественное сравнение моделей выполнялось по среднему абсолютному отклонению и среднеквадратичному отклонению между прогнозируемой и экспериментальной степенью вулканизации (табл. 4).

Во всех случаях использование физико-информированных нейронных сетей для модернизированной модели дает существенно меньшие значения среднего абсолютного отклонения по сравнению с моделью Камала, особенно при температуре 155 °C, где относительная погрешность уменьшается почти на порядок. При этом различия в среднеквадратичном отклонении менее выражены, что объясняется высокой степенью общего совпадения кривых, однако и здесь модернизированная модель демонстрирует преимущество.

Таблица 4

Метрики качества моделирования

T, °C	Среднее абсолютное отклонение, %		Среднеквадратичное отклонение, %	
	Модель Камала	Модернизированная модель Корана	Модель Камала	Модернизированная модель Корана
145	7,552	4,3	0,0098	0,0061
155	13,563	2,0	0,0101	0,0053
165	12,368	0,9	0,0109	0,0044

Полученные результаты показывают, что модернизированная модель Корана при корректном определении ее параметров с использованием физико-информированных нейронных сетей обеспечивает заметное повышение точности описания процесса вулканизации. Особенно важно, что модернизированная модель не только уменьшает среднюю погрешность, но и лучше воспроизводит форму кривых в области индукционного периода и выхода на плато, что критично при расчете времени выдержки изделий в пресс-формах.

Заключение

Выполнен сравнительный анализ двух кинетических моделей изотермической вулканизации резиновой смеси – модели Камала и модернизированной модели Корана, реализованных с использованием физико-информированных нейронных сетей. На основании реометрических данных при температурах 145, 155 и 165 °C показано, что модернизированная модель обеспечивает более низкие значения среднего абсолютного и среднеквадратичного отклонений, а также лучшее согласование с экспериментальными зависимостями степени вулканизации.

Использование физико-информированных нейронных сетей для определения параметров кинетических моделей вулканизации является перспективным направлением, поскольку позволяет учитывать сложный характер протекания процесса и не требует в процессе параметрической идентификации многократного расчета математических моделей, что при условии большой размерности и сложности последних подразумевает увеличение использования ресурсов вычислительной системы и времени расчетов. В дальнейшем планируется распространить предложенный подход на нестационарные температурные режимы и учесть перенос тепла и массы в толстостенных армированных конструкциях, что позволит создавать цифровые модели технологических процессов, учитывающие как кинетику вулканизации, так и тепломассообмен в изделии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФГБОУ «Воронежский государственный университет инженерных технологий» № FZGW-2026-0006 «Научно-практические основы синтеза, модификации и переработки полимеров с применением природоподобных (интеллектуальных) технологий».

Список литературы

1. Coran, A. Y. Vulcanization. Part IV. The Effects of Compounding Variables on the Nature of Rubber Networks / A. Y. Coran // Rubber Chemistry and Technology. – 1964. – Vol. 37, No. 3. – P. 673–678.

2. Kamal, M. R. Thermoset characterization for moldability analysis / M. R. Kamal // Polymer Engineering & Science. – 1974. – Vol. 14, No. 3. – P. 231–239.

3. Raissi, M. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations / M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686–707. doi: 10.1016/j.jcp.2018.10.045

4. Physics-Informed Machine Learning / G. E. Karniadakis, Y. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, L. Yang // Nature Reviews Physics. – 2021. – Vol. 3, No. 6. – P. 422–440. doi: 10.1038/s42254-021-00314-5

5. Jagtap, A. D. Extended Physics-Informed Neural Networks (XPINNs): A generalized Space-Time Domain Decomposition Based Deep Learning Framework for Nonlinear Partial Differential Equations / A. D. Jagtap, G. E. Karniadakis // Communications in Computational Physics. – 2020. – Vol. 28, No. 5. – P. 2002–2041. doi: 10.4208/cicp.OA-2020-0164

6. Программный комплекс для решения задач математического моделирования процесса изотермической вулканизации / С. Г. Тихомиров, О. В. Карманова, Ю. В. Пятаков, А. А. Маслов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 3(69). – С. 93–99. doi: 10.20914/2310-1202-2016-3-93-99

7. Управление процессом вулканизации на основе моделирования и оценки ключевых параметров модели / С. Г. Тихомиров, А. А. Маслов, О. В. Карманова, И. А. Хаустов, В. К. Битюков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 4. – С. 22–34. doi: 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/22-34

8. Тихомиров, С. Г. Программное обеспечение для исследования процессов вулканизации полимерных композиций с помощью математического моделирования / С. Г. Тихомиров, А. А. Маслов, О. В. Карманова, [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 544–558. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.544-558

9. Оптимизация гиперпараметров в моделях машинного обучения: сравнительное исследование / В. В. Денисенко, А. А. Маслов, Л. С. Чесников, К. С. Клименко // Автоматизация. Современные технологии. – 2023. – Т. 77, № 10. – С. 475–480. doi: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-475-480

Comparative Analysis of Kinetic Models of Isothermal Vulcanization of Rubber Compounds Using a Physically Informed Neural Network

© A. A. Maslov[1] ✉, S. G. Tikhomirov[1], O. V. Karmanova[2], I. A. Khaustov[1], E. E. Titova[1]

[1] *Department of Information and Control Systems, imasslove@mail.ru;*
[2] *Department of Organic Compound Technology, Polymer Processing and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation*

Keywords: isothermal vulcanization; kinetic model; mathematical modeling; rheometry.

Abstract: A comparative analysis of kinetic models of isothermal vulcanization of a rubber mixture based on physically informed neural networks is presented. The Kamal model and the extended kinetic Koran model, described by a system of

differential equations, are considered. Both models are implemented within a single architecture of a physically informed neural network and are trained on experimental rheometric data representing the torque-time dependence at temperatures of 145, 155, and 165 °C. A neural network analysis was performed using each of the kinetic models. It was shown that the extended Koran model provides higher accuracy in terms of the average absolute deviation and the standard deviation compared to the Kamal model. The obtained results confirm the effectiveness of using a physically informed neural network to determine the parameters of the kinetic models of vulcanization and can be used in the calculation of vulcanization modes.

References

1. Coran A.Y. Vulcanization. Part IV. The Effects of Compounding Variables on the Nature of Rubber Networks, *Rubber Chemistry and Technology*, 1964, vol. 37, no. 3, pp. 673-678.

2. Kamal M.R. Thermoset characterization for moldability analysis, *Polymer Engineering & Science*, 1974, vol. 14, no. 3, pp. 231-239.

3. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations, *Journal of Computational Physics*, 2019, vol. 378, pp. 686-707. doi: 10.1016/j.jcp.2018.10.045

4. Karniadakis G.E., Kevrekidis Y., Lu L., Perdikaris P., Wang S., Yang L. Physics-Informed Machine Learning, *Nature Reviews Physics*, 2021, vol. 3, no. 6, pp. 422-440. doi: 10.1038/s42254-021-00314-5

5. Jagtap A.D., Karniadakis G.E. Extended Physics-Informed Neural Networks (XPINNs): A generalized Space-Time Domain Decomposition Based Deep Learning Framework for Nonlinear Partial Differential Equations, *Communications in Computational Physics*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 2002-2041. doi: 10.4208/cicp.OA-2020-0164

6. Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Pyatakov Yu.V., Maslov A.A. [Software package for solving problems of mathematical modeling of the isothermal vulcanization process], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of Voronezh State University of Engineering Technologies], 2016, no. 3(69), pp. 93-99. doi: 10.20914/2310-1202-2016-3-93-99 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Tikhomirov S.G., Maslov A.A., Karmanova O.V. [et al.] [Control of the vulcanization process based on modeling and estimation of key model parameters], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2024, no. 4, pp. 22-34. doi: 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/22-34 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Tikhomirov S.G., Maslov A.A., Karmanova O.V. [et al.] [Software for studying vulcanization processes of polymer compositions using mathematical modeling]. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 544-558. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.544-558 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Denisenko V.V., Maslov A.A., Chesnikov L.S., Klimenko K.S. [Hyperparameter optimization in machine learning models: a comparative study], *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2023, vol. 77, no. 10, pp. 475-480. doi: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-475-480 (In Russ., abstract in Eng.)

Vergleichende Analyse von Modellen zur isothermen Vulkanisationskinetik von Kautschukmischungen mithilfe des physikalisch fundierten neuronalen Netzes

Zusammenfassung: Es ist eine vergleichende Analyse kinetischer Modelle der isothermen Vulkanisation von Kautschukmischungen auf Basis physikalisch informierter neuronaler Netze vorgestellt. Das Kamal-Modell und das erweiterte Koran-Modell, beschrieben durch ein System von Differentialgleichungen, sind betrachtet. Beide Modelle sind in einer einzigen Architektur des physikalisch informierten neuronalen Netzes implementiert und sind anhand experimenteller rheometrischer Daten trainiert, die die Drehmoment-Zeit-Abhängigkeit bei Temperaturen von 145, 155 und 165 °C darstellen. Mit jedem der kinetischen Modelle ist die Analyse mittels neuronaler Netze durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass das erweiterte Koran-Modell im Vergleich zum Kamal-Modell eine höhere Genauigkeit hinsichtlich der mittleren absoluten Abweichung und der mittleren quadratischen Abweichung aufweist. Die erzielten Ergebnisse bestätigen die Effektivität der Verwendung des physikalisch informierten neuronalen Netzes zur Bestimmung der Parameter der kinetischen Vulkanisationsmuster und können zur Berechnung von Vulkanisationsbedingungen für dickwandige Kautschukprodukte eingesetzt werden.

Analyse comparative des models de kinétique de vulcanisation isothermique de la méthylétechloréte à l'aide d'une network de neurons physicellement informé

Résumé: Est présentée une analyse comparative des modèles de kinétique de vulcanisation isothermique de la méthylétechlôrée à l'aide de réseaux de neurones physicellement informés. Sont décrits le modèle de Kamal et le modèle cinétique coranique étendu par le système d'équations différentielles. Les deux modèles sont mis en œuvre dans le cadre d'une architecture de réseau neuronal informatisé et formés à l'aide de données rhéométriques expérimentales représentant la relation couple-temps à des températures de 145, 155 et 165 °C. Est réalisée l'analyse du réseau neuronal à l'aide de tous les modèles cinétiques. Est démontré que le modèle élargi de Koran offre une plus grande précision en termes de déviation absolue moyenne et de variance en comparaison avec le modèle Kamal. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de l'utilisation d'un réseau neuronal physiquement informé pour déterminer les paramètres des modèles cinétiques de vulcanisation et peuvent être utilisés pour calculer les régimes de vulcanisation des produits en caoutchouc à paroi épaisse.

Авторы: ***Маслов Александр Александрович*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных и управляющих систем; ***Тихомиров Сергей Германович*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и управляющих систем; ***Карманова Ольга Викторовна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности; ***Хаустов Игорь Анатольевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем; ***Титова Екатерина Евгеньевна*** – студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия.

УДК 004.056.53:336.71
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.436-451

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ DDoS-АТАК В SDN-ИНФРАСТРУКТУРЕ ФИНАНСОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ С УЧЕТОМ АКТУАЛЬНОЙ РОССИЙСКОЙ РЕГУЛЯТОРНОЙ БАЗЫ И ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

© В. В. Бритвина[1,2] ✉, Г. П. Конюхова[3], Е. О. Боброва[4], М. А. Иванов[4], А. О. Гусев[4], Ж. В. Мекшенева[2], О. В. Дубровина[5]

[1] *Кафедра «Инфокогнитивные технологии», Saaturn2026@mail.ru; ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Российская Федерация;*
[2] *кафедра «Прикладная математика», АНО ВО «Московский университет «Синергия», Москва, Российская Федерация;*
[3] *кафедра «Управление и информатика в технических системах», ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация;*
[4] *кафедра «Информационная безопасность», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Российская Федерация;*
[5] *Многопрофильный колледж*, *ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: обнаружение атак; открытые датасеты; программно-определяемые сети; регуляторное соответствие; финансовые организации; DDoS-атаки; Random Forest; XGBoost.

Аннотация: Рассмотрена задача оценки применимости методов обнаружения DDoS-атак в SDN-инфраструктуре финансовых организаций. Актуальность исследования обусловлена высокой значимостью атак типа «отказ в обслуживании» для обеспечения доступности цифровых сервисов, а также повышенной критичностью контроллера и каналов управления в программно-определяемых сетях. Проведен сравнительный анализ методов машинного обучения, глубокого обучения и ансамблевых моделей по трем группам критериев: качество обнаружения, воспроизводимость и регуляторно-эксплуатационная применимость. Показано, что методы семейства Random Forest и XGBoost-подобные ансамбли обеспечивают рациональный баланс между точностью, объяснимостью, скоростью инференса и удобством интеграции в контуры SIEM/SOC. Отмечено, что наиболее сложные deep-модели могут демонстрировать высокие лабораторные метрики, однако уступают интерпретируемым ансамблевым методам по воспроизводимости, аудируемости и эксплуатационной зрелости. Сделан вывод о необходимости оценивать методы обнаружения DDoS-атак не только по Accuracy и F1-score, но и по совокупности критериев, связанных с открытостью данных, переносимостью результатов и соответствием требованиям регулируемой финансовой инфраструктуры.

Введение

Программно-определяемые сети (*англ*. Software Defined Networks (SDN)) продолжают рассматриваться как одна из базовых архитектур для гибкого управления сетевой инфраструктурой, включая сегментацию, программируемое рас-

пределение правил и централизованный контроль [1]. Для финансовых организаций преимущества SDN сочетаются с очевидной уязвимостью: контроллер и каналы управления становятся критически важными элементами, нарушение доступности которых способно повлиять как на защиту информации, так и на непрерывность платежных и клиентских сервисов [2 – 4].

Вопросы архитектурной устойчивости и сохранения работоспособности цифровых систем при сбоях дополнительно подчеркивают значимость системного подхода к реализации отказоустойчивости программного обеспечения и инфраструктуры [5].

В ряде более ранних работ по данной теме основной акцент делался на собственные математические модели и экспериментальные метрики. Однако такой подход неизбежно вызывает вопросы о воспроизводимости результатов, если не представлены полный стенд, исходные журналы и программный код. Поэтому в настоящей статье тема сформулирована как комплексный анализ применимости методов обнаружения DDoS-атак, а аналитическая часть построена на двух опорах: официальной российской регуляторной базе и открытых данных с опубликованными результатами исследований.

Цель статьи – сформировать воспроизводимую схему оценки применимости методов обнаружения DDoS-атак в финансовой SDN-инфраструктуре и на этой основе определить методы, наиболее целесообразные для практического внедрения.

Материалы и методы

Методическая схема исследования построена как воспроизводимый аналитический обзор, в котором сопоставление методов обнаружения DDoS-атак выполняется не на основе закрытого экспериментального стенда, а на базе официальных документов, открытых датасетов и опубликованных результатов рецензируемых работ. Такой подход выбран сознательно, поскольку для финансовой организации значение имеют не только максимальные лабораторные метрики, но и проверяемость источников, переносимость выводов и возможность независимой верификации результатов в рамках внутреннего контроля и аудита.

В качестве эмпирической базы использованы три группы источников. Первая группа включает официальную статистику Банка России по компьютерным атакам и инцидентам операционной надежности в финансовой сфере за 2024 год [6], она позволяет обосновать практическую значимость DDoS-угроз именно для банковского и платежного контура. Вторая группа охватывает публичные датасеты CICDDoS2019 [7] и InSDN [8], которые служат воспроизводимой основой для сопоставления методов по потоковым признакам и по SDN-специфичным сценариям атак [9, 10]. Третья группа состоит из современных публикаций, в которых результаты для различных моделей приведены на открытых данных и представлены в сопоставимой форме.

Сравнение методов проводилось по трем измерениям. Первое измерение характеризует качество обнаружения и включает показатели Accuracy, Precision, Recall и F1-score, то есть стандартный набор метрик для задач бинарной и многоклассовой классификации сетевых атак. Второе измерение отражает охват и воспроизводимость результатов: приоритет отдается подходам, протестированным на нескольких публичных датасетах, так как это снижает риск переобучения на особенностях единственного набора данных и повышает доверие к выводам. Третье измерение описывает регуляторно-эксплуатационную применимость, то есть совместимость метода с требованиями ГОСТ Р 57580.1–2017, Положений Банка России № 851-П и № 821-П, а также с методикой оценки угроз ФСТЭК России от 05.02.2021 [11 – 14].

При интерпретации результатов отдельно учитывались факторы объяснимости, возможности работы на flow-level признаках, латентности инференса, сложности дообучения и удобства интеграции в контур SIEM/SOC. Для финансовой организации эти характеристики критичны, поскольку даже формально высокая точность алгоритма не гарантирует его пригодность к эксплуатации, если решение трудно сопровождать, невозможно объяснить аудитору или нельзя внедрить в near real-time режим без существенной перестройки инфраструктуры.

Ограничением исследования является отсутствие закрытых корпоративных телеметрических данных конкретной финансовой организации. Однако именно это ограничение делает выводы более универсальными: они опираются на открыто верифицируемую базу и могут быть использованы как стартовая рамка для последующей локальной валидации на внутренних потоках трафика, журналах контроллера SDN и событиях средств защиты. Следовательно, предложенная методика не подменяет пилотное внедрение, а задает прозрачную и реплицируемую процедуру предварительного выбора наиболее перспективных методов.

Дополнительно в работе применяется принцип содержательной интерпретации количественных показателей. Различия между значениями Accuracy и F1-score в пределах десятых и сотых долей процента рассматриваются не как достаточное основание для безусловного выбора метода, а как часть более широкой картины, в которую входят воспроизводимость, объяснимость и эксплуатационные ограничения. Такой подход особенно важен для регулируемой среды финансового сектора, где решение должно быть не только эффективным на тестовых данных, но и управляемым в реальном контуре защиты информации.

Итоговая процедура оценки включает последовательное сопоставление источников угроз, признакового пространства, опубликованных метрик, сценариев внедрения и требований нормативной базы. При формировании перечня альтернатив учитывались дополнительные обзорные и прикладные работы по машинному и глубокому обучению для обнаружения DDoS-атак в SDN-среде [15 – 31]. За счет этого методика может использоваться как шаблон для первичной фильтрации подходов перед построением пилотного стенда и подготовкой программы локальных испытаний в банковской SDN-инфраструктуре.

Результаты и обсуждение

Актуальность угрозы DDoS для финансовых организаций и регуляторная база

По данным Банка России, в 2024 году через автоматизированную систему обработки инцидентов (**АСОИ**) ФинЦЕРТ получено более 750 сообщений о фактах компьютерных атак и компьютерных инцидентов в финансовой сфере [6]. Основными типами атак стали DDoS-атаки, компрометация учетных данных и вредоносное программное обеспечение. Доля атак типа «отказ в обслуживании» составила 39,49 % – почти две пятых от общего объема компьютерных угроз, направленных на финансовый сектор (рис. 1).

Не менее важен операционный аспект. Банк России указывает, что в 2024 году было выявлено более 1500 событий, предположительно связанных со сбоями на технологических участках; 680 из них подтверждены как реальные сбои, а 429 отнесены к инцидентам операционной надежности (**ИОН**). При этом 13,2 % таких ИОН были вызваны компьютерными атаками, в том числе DDoS-атаками. Распределение ИОН по ключевым технологическим процессам показано на рис. 2.

Совокупность приведенных данных свидетельствует о том, что DDoS занимает ведущее место в распределении атак на финансовый сектор и непосредственно влияет на критичные цифровые сервисы. Это означает, что выбор метода

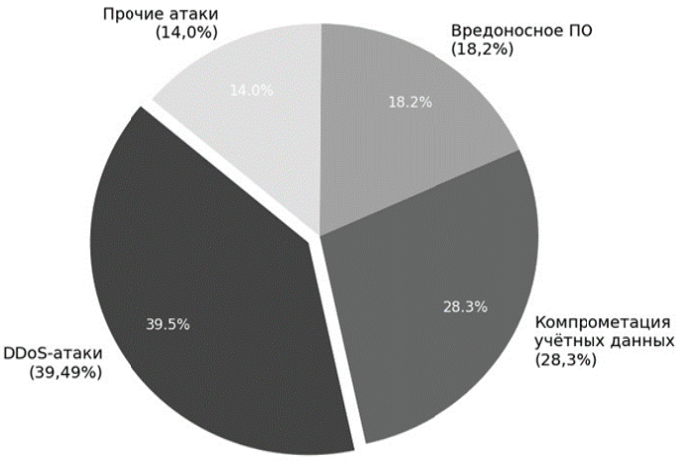


Рис. 1. Распределение типов компьютерных атак в финансовой сфере (Банк России, 2024)

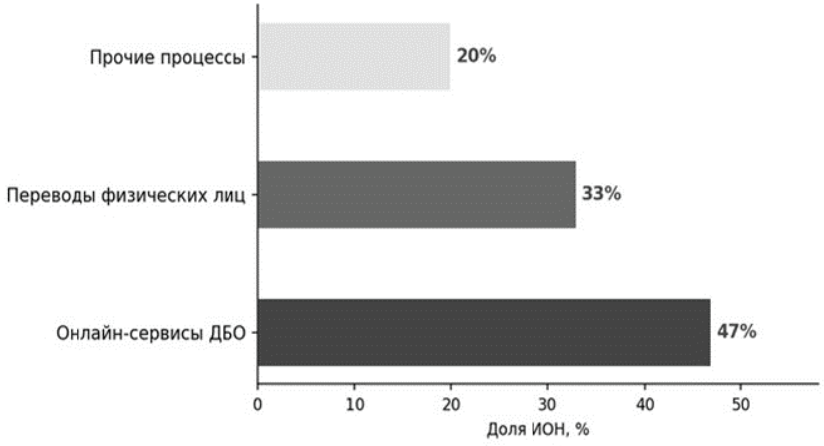


Рис. 2. Распределение инцидентов операционной надежности по затронутым технологическим процессам (Банк России, 2024)

детекции нельзя сводить только к максимизации точности на одном датасете: необходима явная связь с требованиями по доступности сервисов и регуляторному контролю.

Актуальная российская регуляторная база включает как минимум четыре блока: ГОСТ Р 57580.1–2017, Положение Банка России № 851-П, Положение Банка России № 821-П и методику оценки угроз ФСТЭК России от 05.02.2021 [11 – 14] (табл. 1). Положение № 851-П применяется с 29 марта 2025 года и заменило Положение № 683-П; Положение № 821-П вступило в силу с 1 апреля 2024 года, при этом Положение № 719-П признано утратившим силу.

Открытые данные для анализа применимости методов

Для анализа применимости методов в статье использованы не закрытые внутренние выборки, а открытые данные и публикации, опирающиеся на публичные SDN-датасеты. Это обеспечивает более высокую воспроизводимость результатов и позволяет честно разделить первичные входные данные и аналитические выводы.

Таблица 1

Актуальные нормативные документы и их роль в анализе применимости методов

Документ	Смысл для финансовой организации	Что дает для анализа методов
ГОСТ Р 57580.1–2017	Базовый отраслевой стандарт защиты информации финансовых организаций	Требует, чтобы решение поддерживало мониторинг, регистрацию событий и управляемость мер защиты
Положение Банка России № 851-П	Актуальный документ, устанавливающий обязательные требования к защите информации при осуществлении банковской деятельности; применяется с 29.03.2025	Подталкивает к использованию методов, пригодных для встраивания в реальный банковский контур защиты, мониторинга и аудита
Положение Банка России № 821-П	Актуальный документ по защите информации при переводах; действует с 01.04.2024, при этом 719-П утратило силу	Сдвигает акцент с абстрактной точности на устойчивость, контролируемость и проверяемость решения
Методика оценки угроз ФСТЭК России, 2021	Задает порядок и содержание работ по определению угроз безопасности информации	Позволяет трактовать DDoS как угрозу, влияющую не только на ИБ, но и на непрерывность критичных сервисов

Официальная страница CICDDoS2019 указывает, что датасет содержит как легитимный трафик, так и современные DDoS-атаки, а также результаты анализа сетевого трафика в формате CSV с признаками, извлеченными CICFlowMeter-V3. На этапе моделирования фонового трафика авторы использовали поведенческие профили 25 пользователей на базе HTTP, HTTPS, FTP, SSH и e-mail [7].

Наряду с CICDDoS2019 в SDN-литературе широко используется набор InSDN – публично доступный SDN-датасет, включающий нормальный трафик и различные классы атак, специфичных для элементов платформы SDN [8, 9] (табл. 2).

Сравнительный анализ методов обнаружения DDoS-атак в SDN

Систематизация результатов из научной литературы выполняется по трем измерениям: качеству обнаружения на открытых данных, охвату и воспроизводимости на публичных датасетах, а также совместимости с регуляторными и эксплуатационными требованиями финансовой организации.

Первое измерение – качество обнаружения. Стандартными метриками оценки классификаторов в задаче обнаружения DDoS-атак являются Accuracy (доля верно классифицированных образцов), Precision (точность), Recall (полнота) и F1-score (гармоническое среднее Precision и Recall):

Таблица 2

Открытые данные и публикации, использованные в анализе применимости

Набор данных	Подтвержденные открытые характеристики	Почему важен	Ограничения
CICDDoS2019	Открытый набор UNB; PCAP + CSV; CICFlowMeter-V3; 25 профилей; современные DDoS [7]	Воспроизводимая основа для анализа потоковых признаков	Не является специфически банковским
InSDN	Публично доступный SDN-датасет; нормальный трафик и SDN-специфичные классы атак [8, 9]	Опорный бенчмарк в SDN-литературе	Часть публикаций привязана только к InSDN
Много-контроллерные наборы	Собственные стенды; XGBoost показал 98,5 % при test time 70 мс [29]	Оценка эксплуатационных компромиссов	Хуже воспроизводимы, чем открытые бенчмарки

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}};$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}};$$

$$F_1 = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}},$$

где TP – истинно положительные результаты; FP – ложноположительные; FN – ложноотрицательные [15]. Опубликованные значения метрик для рассматриваемых методов на открытых SDN-датасетах приведены в табл. 3 и на рис. 3.

Плотная концентрация значений Accuracy в диапазоне 98 – 100 % свидетельствует о высокой зрелости направления. Вместе с тем именно поэтому чисто «метрическое» сравнение недостаточно для прикладного вывода: различия в десятых и сотых долях процента практически неразличимы в реальных условиях эксплуатации и не позволяют однозначно выбрать метод без учета второго и третьего измерений.

Второе измерение – охват и воспроизводимость. Методы, верифицированные на нескольких публичных датасетах (InSDN, CICDDoS2019, CICDoS2017), демонстрируют более высокую обобщающую способность по сравнению с методами, протестированными на единственном наборе данных.

Третье измерение – регуляторно-эксплуатационная применимость (табл. 4, рис. 4). Для финансовой организации, работающей в рамках ГОСТ Р 57580.1–2017, Положений № 851-П и № 821-П, существенны следующие критерии: совместимость с flow-level признаками и SDN-телеметрией; объяснимость результатов для аудита и внутреннего контроля; пригодность к near real-time внедрению; простота периодического дообучения; удобство интеграции с SIEM/SOC [11 – 14]. Из сопоставления следует, что методы OvR + RF и RF удовлетворяют всем пяти критериям применимости при высокой точности. GWO + LightGBM занимает промежуточную позицию: сочетает near real-time инференс с частичной объяснимостью. FedLAD выделяется охватом трех публичных датасетов, что повышает воспроизводимость оценок, однако архитектура федеративного обучения усложняет

Таблица 3

Опубликованные метрики методов на открытых SDN-датасетах

Метод	Датасет(ы)	Accuracy, %	Precision	Recall	F1	Источник
RF (2023)	InSDN	98,72	98,7	98,7	98,7	Batool et al. [10]
GWO+LGBM (2023)	InSDN	99,80	99,8	99,8	99,8	
S-DATE/D-SEM (2024)	InSDN, IoTID-20, UNSWNB-15	98,90	98,9	98,9	98,9	
MDDCC (2024)	InSDN	99,24	99,2	99,2	99,2	
FedLAD (2025)	InSDN, CICDDoS2019, CICDoS2017	98,07	98,1	98,1	98,1	
Transformer (2024)	InSDN	99,02	99,0	99,0	99,0	
DLTHF (2025)	InSDN	99,97	99,97	99,97	99,97	
OvR+RF (2024)	InSDN	99,99	99,99	99,99	99,99	

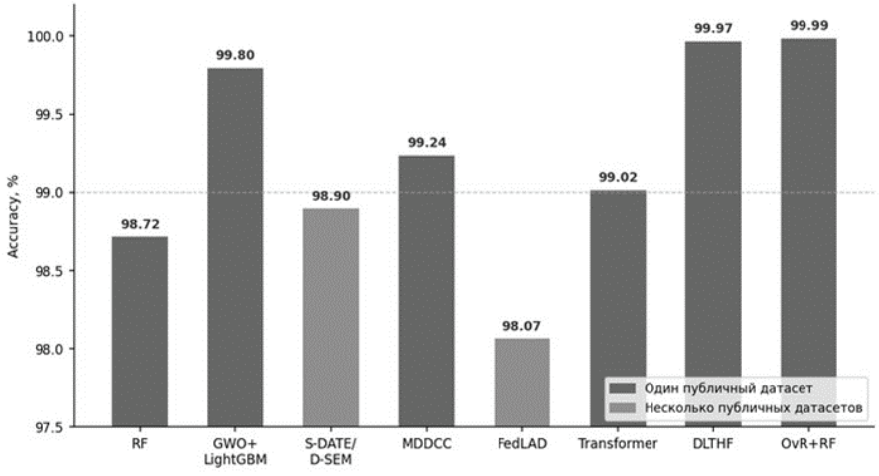


Рис. 3. Опубликованные значения Accuracy методов обнаружения DDoS-атак на открытых SDN-датасетах; отдельной заливкой отмечены методы, верифицированные на нескольких публичных датасетах

сопровождение. Deep-модели (DLTHF, Transformer, MDDCC), несмотря на очень высокую точность, характеризуются низкой объяснимостью и непригодны к near-real-time применению без специализированной инфраструктуры.

Отдельный аргумент в пользу XGBoost-подобных решений дает исследование Sapkota et al. [29], где XGBoost показал оптимальный баланс точности и скорости. Сравнение времени классификации приведено на рис. 5.

Таблица 4

Качественная оценка регуляторно-эксплуатационной применимости методов

Метод	Flow-признаки	Объяснимость/ аудит	NRT	Дообучение	SIEM/ SOC	Характеристика
OvR + RF	Да	Да	Да	Да	Да	Высокая по всем критериям
RF	Да	Да	Да	Да	Да	
GWO + + LGBM	Да	Частично	Да	Да	Да	Хорошая, ограничена объяснимость
FedLAD	Да	Нет	Да	Нет	Да	Средняя: мультидатасетный охват, сложность сопровождения
S-DATE/ D-SEM	Да	Нет	Нет	Да	Да	Средняя: широкий охват, задержка инференса
Transformer	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Ниже средней: слабая аудируемость
DLTHF	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Ниже средней: максимальная точность, минимальная объяснимость
MDDCC	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Ниже средней: специализированная архитектура

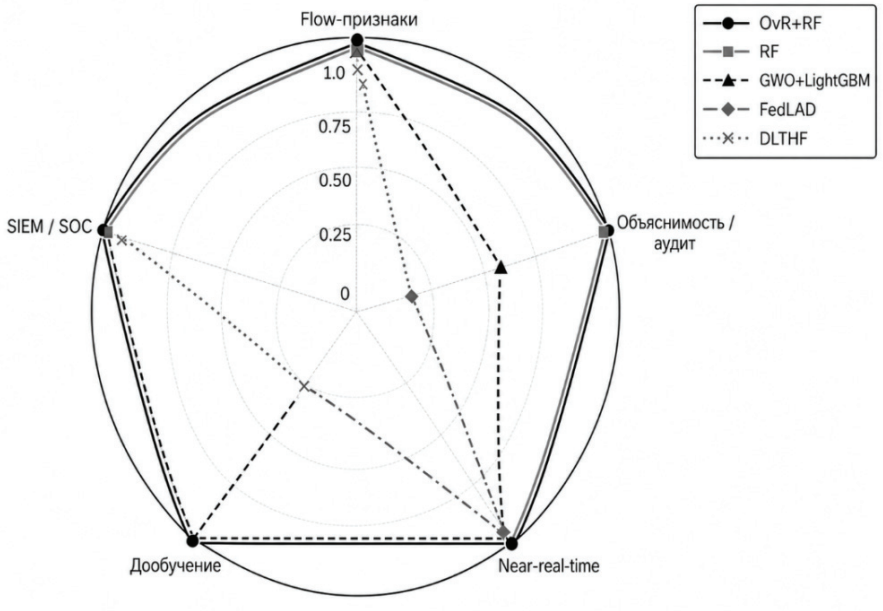


Рис. 4. Профиль регуляторно-эксплуатационной применимости выбранных методов; площадь фигуры соответствует совокупной степени удовлетворения критериев

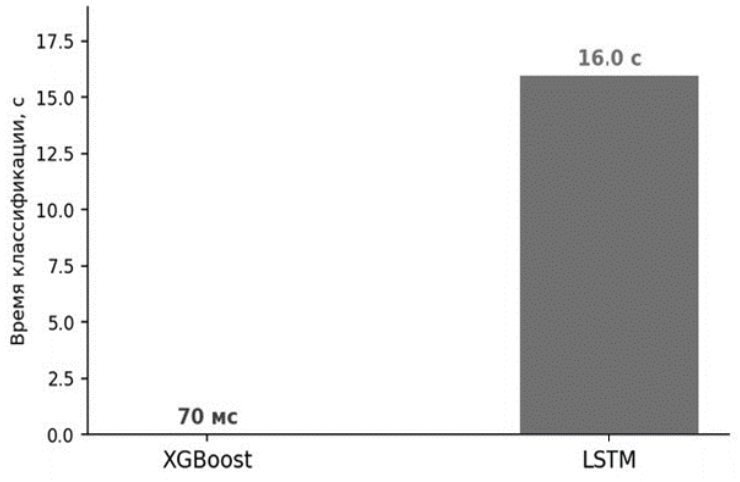


Рис. 5. Сравнение времени классификации тестового массива: XGBoost vs LSTM

Таблица 5

Рекомендуемая поэтапная схема внедрения метода в финансовой организации

Этап	Действия	Измеримые показатели	Практический результат
Пилот	Сбор Flow statistics, журналов контроллера и событий сетевых устройств на ограниченном сегменте	Полнота логов, корректность меток времени, доля потерь телеметрии	Формируется база для честного обучения без подгонки метрик
Сравнение	Параллельная проверка RF/XGBoost/одного гибридного метода на открытых и локальных данных	Accuracy, F1-score на валидации, latency инференса, доля ложных срабатываний	Выбор метода с наилучшим балансом качества и эксплуатации
Интеграция	Связка модели с SIEM, SOC и регламентом реагирования на DDoS	Время детекции, время подтверждения инцидента, доля автоматических действий	Система начинает работать как часть защитного контура
Эксплуатация	Периодическое дообучение, ревизия признаков и уточнение модели угроз	Дрейф модели, обновление датасета, частота корректировки правил	Поддерживается устойчивость решения при изменении профиля трафика и угроз

Рекомендуемая архитектура и практическая схема внедрения

На основании сравнительного анализа можно сформулировать прикладной вывод: наиболее реалистичным стартовым вариантом для финансовой организации является не самая сложная deep-модель, а интерпретируемый ансамблевый или деревообразный подход, встроенный в контур SDN-телеметрии, SIEM и SOC.

Переход от пилотного сегмента к полному контуру защиты требует не только достижения приемлемых значений Accuracy и F1-score, но и подтверждения работоспособности системы в условиях реального трафика финансовой организации. Именно поэтому этапы интеграции и эксплуатации в табл. 5 включают показатели, связанные с временем детекции и поведением модели при дрейфе трафика.

Заключение

Рассмотрена задача оценки применимости методов обнаружения DDoS-атак в SDN-инфраструктуре финансовых организаций. Показано, что для регулируемой финансовой среды выбор метода детекции не должен основываться только на максимальных значениях Accuracy или F1-score, полученных в лабораторных условиях. Существенное значение имеют воспроизводимость результатов, объяснимость срабатываний, скорость инференса, возможность аудита и интеграция с действующими процессами мониторинга и реагирования.

На основании анализа открытых наборов данных CICDDoS2019 и InSDN, опубликованных результатов исследований и требований российской регуляторной базы сделаны следующие выводы:

– использование открытых датасетов позволяет сформировать воспроизводимую основу предварительного сравнения методов обнаружения DDoS-атак, однако не заменяет локальную валидацию на потоках трафика, журналах SDN-контроллера и событиях средств защиты конкретной финансовой организации;

– методы семейства Random Forest и XGBoost-подобные ансамбли обладают наибольшим практическим потенциалом для первичного внедрения, поскольку сочетают высокое качество обнаружения с интерпретируемостью, сравнительно низкой задержкой инференса и удобством интеграции в контуры SIEM/SOC;

– глубокие и гибридные модели могут демонстрировать более высокие значения метрик на отдельных наборах данных, но их применение в финансовой организации требует дополнительного обоснования с точки зрения объяснимости, устойчивости к изменению профиля трафика, трудоемкости сопровождения и готовности инфраструктуры;

– предложенная схема оценки позволяет сократить риск выбора модели, которая показывает высокие публикационные результаты, но оказывается недостаточно удобной для эксплуатации, внутреннего контроля и последующего аудита.

Практическая значимость работы заключается в формировании прозрачного подхода к отбору методов обнаружения DDoS-атак перед построением пилотного стенда. Предложенная логика сравнения может использоваться для подготовки технических требований к сбору flow-level телеметрии, журналов контроллера, событий сетевых устройств и данных средств защиты, а также для согласования критериев оценки между подразделениями информационной безопасности, эксплуатации, SOC и внутреннего аудита.

Дальнейшее развитие исследования целесообразно связать с экспериментальной проверкой выбранных методов на локальных данных финансовой организации, оценкой доли ложных срабатываний в условиях реального трафика, анализом устойчивости моделей к дрейфу признаков и разработкой регламента периодического дообучения. Такой этап позволит перейти от аналитического отбора перспективных подходов к их практической апробации в банковской SDN-инфраструктуре.

Список литературы

1. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey / D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. Verissimo [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, No. 1. – P. 14–76. doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999

2. Dupont, B. The cyber-resilience of financial institutions: significance and applicability / B. Dupont // Journal of Cybersecurity. – 2019. – Vol. 5, Iss. 1. – Art. tyz013. doi: 10.1093/cybsec/tyz013

3. Smaga, P. Profiling the victim – cyber risk in commercial banks / P. Smaga // Computers & Security. – 2025. – Vol. 150. – Art. 104274. doi: 10.1016/j.cose.2024.104274

4. Smaga, P. Evaluating cyber attacks on central banks - identification of trends in cyber threat landscape / P. Smaga // Computers & Security. – 2026. – Vol. 160. – Art. 104742. doi: 10.1016/j.cose.2025.104742

5. Ншот, А. Ф. В. Анализ отказоустойчивости программного обеспечения в архитектуре цифрового предприятия: системный подход / А. Ф. В. Ншот, Г. П. Конюхова, В. В. Бритвина // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2025. – Т. 21, № 3 (41). – С. 31–37.

6. Банк России. Обзор основных типов компьютерных атак в финансовой сфере в 2024 году. – Москва : Банк России, 2025. – Текст : электронный. – URL : https://www.cbr.ru/collection/collection/file/55129/attack_2024.pdf (дата обращения: 05.05.2026).

7. Developing Realistic Distributed Denial of Service (DDoS) Attack Dataset and Taxonomy / I. Sharafaldin, A. H. Lashkari, S. Hakak, A. A. Ghorbani // 2019 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). – 2019. – P. 1–8. doi: 10.1109/CCST.2019.8888419

8. InSDN: A Novel SDN Intrusion Dataset / M. S. Elsayed, N.-A. Le-Khac, S. Dev, A. D. Jurcut // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 165263–165284. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022633

9. DDoS in SDN: a review of open datasets, attack vectors and mitigation strategies / W. Hill, Y. T. Acquaah, J. Mason [et al.] // Discover Applied Sciences. – 2024. – Vol. 6. – Art. 472. doi: 10.1007/s42452-024-06172-x

10. A Comprehensive Review of DDoS Detection and Mitigation in SDN Environments: Machine Learning, Deep Learning, and Federated Learning Perspectives / S. Batool, M. Aslam, E. Akpokodje, S. F. Jilani // Electronics. – 2025. – Vol. 14, No. 21. – Art. 4222. doi: 10.3390/electronics14214222

11. ГОСТ Р 57580.1–2017. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер. – Москва : Стандартинформ, 2017. – Текст : электронный. – URL : https://docs.cntd.ru/document/1200146534 (дата обращения: 05.05.2026).

12. Банк России. Положение от 30.01.2025 № 851-П «Об установлении обязательных для кредитных организаций, иностранных банков, осуществляющих деятельность на территории Российской Федерации через свои филиалы, требований к обеспечению защиты информации при осуществлении банковской деятельности в целях противодействия осуществлению переводов денежных средств без согласия клиента». – Текст : электронный. – URL : https://www.cbr.ru/Queries/UniDbQuery/File/90134/6262 (дата обращения: 05.05.2026).

13. Банк России. Положение от 17.08.2023 № 821-П «О требованиях к обеспечению защиты информации при осуществлении переводов денежных средств и о порядке осуществления Банком России контроля за соблюдением требований к обеспечению защиты информации при осуществлении переводов денежных средств». – Текст : электронный. – URL : https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408082189/ (дата обращения: 05.05.2026).

14. ФСТЭК России. Методика оценки угроз безопасности информации : методический документ от 05.02.2021. – М., 2021. – Текст : электронный. – URL : https://fstec.ru/files/495/---5--2021-/891/---5--2021-.pdf (дата обращения: 05.05.2026).

15. Ali, T. E. Comparison of ML/DL Approaches for Detecting DDoS Attacks in SDN / T. E. Ali, Y.-W. Chong, S. Manickam // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – Art. 3033. doi: 10.3390/app13053033

16. Ali, T. E. Machine Learning Techniques to Detect a DDoS Attack in SDN: A Systematic Review / T. E. Ali, Y.-W. Chong, S. Manickam // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – Art. 3183. doi: 10.3390/app13053183

17. A Systematic Literature Review on Machine Learning and Deep Learning Approaches for Detecting DDoS Attacks in Software-Defined Networking / A. A. Bahashwan, M. Anbar, S. Manickam [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 9. – Art. 4441. doi: 10.3390/s23094441

18. Comparative Study of AI-Enabled DDoS Detection Technologies in SDN / K.-M. Ko, J.-M. Baek, B.-S. Seo, W.-B. Lee // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 17. – Art. 9488. doi: 10.3390/app13179488

19. Real-Time Detection of DDoS Attacks Based on Random Forest in SDN / R. Ma, Q. Wang, X. Bu, X. Chen // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 13. – Art. 7872. doi: 10.3390/app13137872

20. Optimized MLP-CNN Model to Enhance Detecting DDoS Attacks in SDN Environment / M. A. Setitra, M. Fan, B. L. Y. Agbley, Z. E. A. Bensalem // Network. – 2023. – Vol. 3, No. 4. – P. 538–562. doi: 10.3390/network3040024

21. Ensemble Learning Framework for DDoS Detection in SDN-Based SCADA Systems / S. Oyucu, O. Polat, M. Turkoğlu [et al.] // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 1. – Art. 155. doi: 10.3390/s24010155

22. Detection and mitigation of DDoS attacks based on multi-dimensional characteristics in SDN / K. Wang, Y. Fu, X. Duan, T. Liu // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 16421. doi: 10.1038/s41598-024-66907-z

23. Clinton, U. B. Classification of DDoS attack traffic on SDN network environment using deep learning / U. B. Clinton, N. Hoque, K. R. Singh // Cybersecurity. – 2024. – Vol. 7. – Art. 23. doi: 10.1186/s42400-024-00219-7

24. Songa, A. V. An integrated SDN framework for early detection of DDoS attacks in cloud computing / A. V. Songa, G. R. Karri // Journal of Cloud Computing. – 2024. – Vol. 13. – Art. 74. doi: 10.1186/s13677-024-00625-9

25. Hassan, A. I. An entropy and machine learning based approach for DDoS attacks detection in software defined networks / A. I. Hassan, E. Abd El Reheem, S. K. Guirguis // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 18159. doi: 10.1038/s41598-024-67984-w

26. Wang, H. Overview of DDoS Attack Detection in Software-Defined Networks / H. Wang, Y. Li // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 38351–38381. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3375395.

27. Naeen, H. M. Enhancing SDN security with deep learning and F-balanced cross-entropy for DDoS detection / H. M. Naeen, M. Ghadamyari, M. Barmar // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 33419. doi: 10.1038/s41598-025-18826-w

28. Estupinan Cuesta, E. P. DDoS Attacks Detection in SDN Through Network Traffic Feature Selection and Machine Learning Models / E. P. Estupinan Cuesta, J. C. Martinez Quintero, J. D. Aviles Palma // Telecom. – 2025. – Vol. 6, No. 3. – Art. 69. doi: 10.3390/telecom6030069

29. Machine Learning-Based Attack Detection and Mitigation with Multi-Controller Placement Optimization over SDN Environment / B. Sapkota, A. Ray, M. K. Yadav [et al.] // Journal of Cybersecurity and Privacy. – 2025. – Vol. 5, No. 1. – Art. 10. doi: 10.3390/jcp5010010

30. Ganeshan, S. A Systematic Review of Machine-Learning-Based Detection of DDoS Attacks in Software-Defined Networks / S. Ganeshan, R. K. Ramasamy // Future Internet. – 2026. – Vol. 18, No. 2. – Art. 109. doi: 10.3390/fi18020109

31. A hybrid machine learning approach for detecting DDoS attacks in software-defined networks / I. A. Mahar, K. Aziz, P. Chakrabarti [et al.] // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16. – Art. 6533. doi: 10.1038/s41598-026-35458-w

---

Comprehensive Analysis of the Applicability of DDoS Attack Detection Methods in the SDN Infrastructure of Financial Organizations with Account of the Current Russian Regulatory Framework and Open Data

© **V. V. Britvina[1,2] ✉, G. P. Konyukhova[3], E. O. Bobrova[4], M. A. Ivanov[4], A. O. Gusev[1], Zh. V. Meksheneva[2], O. V. Dubrovina[5]**

[1] *Department of Infocognitive Technologies, Saaturn2026@mail.ru; Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;*
[2] *Department of Applied Mathematics, Moscow Synergy University, Moscow, Russian Federation;*
[3] *Department of Control and Informatics in Technical Systems, STANKIN Moscow State University of Technology, Moscow, Russian Federation;*
[4] *Department of Information Security, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;*
[5] *Multidisciplinary College, TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: attack detection; DDoS attacks; financial organizations; open datasets; Random Forest; regulatory compliance; software-defined networking; XGBoost.

Abstract: This paper examines the applicability of DDoS attack detection methods within the SDN infrastructure of financial institutions. The study is motivated by the significant impact of denial-of-service attacks on the availability of digital services, as well as the critical nature of controllers and control channels in software-defined networks. A comparative analysis of machine learning, deep learning, and ensemble models was conducted based on three groups of criteria: detection performance, reproducibility, and regulatory/operational applicability. The results demonstrate that Random Forest-based methods and XGBoost-style ensembles offer an optimal balance between accuracy, explainability, inference speed, and ease of integration into SIEM/SOC workflows. While highly complex deep learning models may yield impressive metrics in laboratory settings, they often lag behind interpretable ensemble methods in terms of reproducibility, auditability, and operational maturity. The study concludes that DDoS detection methods should be evaluated not only by metrics such as Accuracy and F1-score but also by a comprehensive set of criteria regarding data transparency, result portability, and compliance with the requirements of regulated financial infrastructure.

References

1. Kreutz D., Ramos F.M.V., Verissimo P., Rothenberg C.E., Azodolmolky S., Uhlig S. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey, *Proceedings of the IEEE*, 2015, vol. 103, no. 1, pp. 14-76. doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999

2. Dupont B. The cyber-resilience of financial institutions: significance and applicability, *Journal of Cybersecurity*, 2019, vol. 5, iss. 1, art. tyz013. doi: 10.1093/cybsec/tyz013

3. Smaga P. Profiling the victim - cyber risk in commercial banks, *Computers & Security*, 2025, vol. 150, art. 104274. doi: 10.1016/j.cose.2024.104274

4. Smaga P. Evaluating cyber attacks on central banks - identification of trends in cyber threat landscape, *Computers & Security*, 2026, vol. 160, art. 104742. doi: 10.1016/j.cose.2025.104742

5. Nshot A.F.V., Konyukhova G.P., Britvina V.V. [Analysis of software fault tolerance in the architecture of a digital enterprise: a systems approach], *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskiye nauki* [Herald of GSTOU. Technical Sciences], 2025, vol. 21, no. 3 (41), pp. 31-37. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Available at: https://www.cbr.ru/collection/collection/file/55129/attack_2024.pdf (accessed 05 May 2026).

7. Sharafaldin I., Lashkari A.H., Hakak S., Ghorbani A.A. Developing Realistic Distributed Denial of Service (DDoS) Attack Dataset and Taxonomy, *2019 International Carnahan Conference on Security Technology* (ICCST), 2019, pp. 1-8. doi: 10.1109/CCST.2019.8888419

8. Elsayed M.S., Le-Khac N.-A., Dev S., Jurcut A.D. InSDN: A Novel SDN Intrusion Dataset, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 165263-165284. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022633

9. Hill W., Acquaah Y.T., Mason J., Limbrick D., Teixeira-Poit S., Coates C., Roy K. DDoS in SDN: a review of open datasets, attack vectors and mitigation strategies, *Discover Applied Sciences*, 2024, vol. 6, art. 472. doi: 10.1007/s42452-024-06172-x

10. Batool S., Aslam M., Akpokodje E., Jilani S. F. A Comprehensive Review of DDoS Detection and Mitigation in SDN Environments: Machine Learning, Deep Learning, and Federated Learning Perspectives, *Electronics*, 2025, vol. 14, no. 21, art. 4222. doi: 10.3390/electronics14214222

11. Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200146534 (accessed 05 May 2026).

12. Available at: https://www.cbr.ru/Queries/UniDbQuery/File/90134/6262 (accessed 05 May 2026).

13.Available at: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408082189/ (accessed 05 May 2026).

14. Available at: https://fstec.ru/files/495/---5--2021-/891/---5--2021-.pdf (accessed 05 May 2026).

15. Ali T.E., Chong Y.-W., Manickam S. Comparison of ML/DL Approaches for Detecting DDoS Attacks in SDN, *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 3033. doi: 10.3390/app13053033

16. Ali T.E., Chong Y.-W., Manickam S. Machine Learning Techniques to Detect a DDoS Attack in SDN: A Systematic Review, *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 3183. doi: 10.3390/app13053183

17. Bahashwan A.A., Anbar M., Manickam S., Al-Amiedy T.A., Aladaileh M.A., Hasbullah I.H. A Systematic Literature Review on Machine Learning and Deep Learning Approaches for Detecting DDoS Attacks in Software-Defined Networking, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 9, art. 4441. doi: 10.3390/s23094441

18. Ko K.-M., Baek J.-M., Seo B.-S., Lee W.-B. Comparative Study of AI-Enabled DDoS Detection Technologies in SDN, *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 17, art. 9488. doi: 10.3390/app13179488

19. Ma R., Wang Q., Bu X., Chen X. Real-Time Detection of DDoS Attacks Based on Random Forest in SDN, *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 13, art. 7872. doi: 10.3390/app13137872

20. Setitra M.A., Fan M., Agbley B.L.Y., Bensalem Z.E.A. Optimized MLP-CNN Model to Enhance Detecting DDoS Attacks in SDN Environment, *Network*, 2023, vol. 3, no. 4, pp. 538-562. doi: 10.3390/network3040024.

21. Oyucu S., Polat O., Turkoğlu M., Polat H., Aksoz A., Ağdaş M. T. Ensemble Learning Framework for DDoS Detection in SDN-Based SCADA Systems, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 1, art. 155. doi: 10.3390/s24010155

22. Wang K., Fu Y., Duan X., Liu T. Detection and mitigation of DDoS attacks based on multi-dimensional characteristics in SDN, *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 16421. doi: 10.1038/s41598-024-66907-z

23. Clinton U.B., Hoque N., Singh K.R. Classification of DDoS attack traffic on SDN network environment using deep learning, *Cybersecurity*, 2024, vol. 7, art. 23. doi: 10.1186/s42400-024-00219-7

24. Songa A.V., Karri G.R. An integrated SDN framework for early detection of DDoS attacks in cloud computing, *Journal of Cloud Computing*, 2024, vol. 13, art. 74. doi: 10.1186/s13677-024-00625-9

25. Hassan A.I., Abd El Reheem E., Guirguis S.K. An entropy and machine learning based approach for DDoS attacks detection in software defined networks, *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 18159. doi: 10.1038/s41598-024-67984-w

26. Wang H., Li Y. Overview of DDoS Attack Detection in Software-Defined Networks, *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 38351-38381. doi: 10.1109/ ACCESS.2024.3375395

27. Naeen H.M., Ghadamyari M., Barmar M. Enhancing SDN security with deep learning and F-balanced cross-entropy for DDoS detection, *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. 33419. doi: 10.1038/s41598-025-18826-w

28. Estupinan Cuesta E.P., Martinez Quintero J.C., Aviles Palma J.D. DDoS Attacks Detection in SDN Through Network Traffic Feature Selection and Machine Learning Models, *Telecom*, 2025, vol. 6, no. 3, art. 69. doi: 10.3390/telecom6030069

29. Sapkota B., Ray A., Yadav M.K., Dawadi B.R., Joshi S.R. Machine Learning-Based Attack Detection and Mitigation with Multi-Controller Placement Optimization over SDN Environment, *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 2025, vol. 5, no. 1, art. 10. doi: 10.3390/jcp5010010

30. Ganeshan S., Ramasamy R.K. A Systematic Review of Machine-Learning-Based Detection of DDoS Attacks in Software-Defined Networks, *Future Internet*, 2026, vol. 18, no. 2, art. 109. doi: 10.3390/fi18020109

31. Mahar I.A., Aziz K., Chakrabarti P., Ahmed N., Ladan M., Javed Y. A hybrid machine learning approach for detecting DDoS attacks in software-defined networks, *Scientific Reports*, 2026, vol. 16, art. 6533. doi: 10.1038/s41598-026-35458-w

Umfassende Analyse der Anwendbarkeit von DDoS-Angriffserkennungsmethoden in der SDN-Infrastruktur von Finanzinstituten unter Berücksichtigung der aktuellen russischen Regulierungsdatenbank und offener Daten

Zusammenfassung: Diese Arbeit untersucht die Anwendbarkeit von DDoS-Angriffserkennungsmethoden in der SDN-Infrastruktur von Finanzinstituten. Die Relevanz der Studie ergibt sich aus der hohen Bedeutung von Denial-of-Service-Angriffen für die Gewährleistung der Verfügbarkeit digitaler Dienste sowie der erhöhten Kritikalität von Controller und Kontrollkanälen in softwaredefinierten Netzwerken. Es ist eine vergleichende Analyse von Machine-Learning-, Deep-Learning- und Ensemble-Modellen anhand von drei Kriteriengruppen durchgeführt: Erkennungsqualität, Reproduzierbarkeit sowie regulatorische und operative Anwendbarkeit. Es hat sich gezeigt, dass Random-Forest-Methoden und XGBoost-ähnliche Ensembles ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Genauigkeit, Erklärbarkeit, Inferenzgeschwindigkeit und einfacher Integration in SIEM/SOC-Frameworks bieten. Es ist festgestellt, dass die komplexesten Deep-Learning-Modelle zwar hohe

Laborwerte erzielen, jedoch hinsichtlich Reproduzierbarkeit, Auditierbarkeit und operativer Reife den interpretierbaren Ensemble-Methoden unterlegen sind. Es ist die Schlussfolgerung gezogen, dass es notwendig ist, Methoden zur Erkennung von DDoS-Angriffen nicht nur anhand der Genauigkeit und des F1-Scores zu bewerten, sondern auch anhand einer Reihe von Kriterien, die mit der Offenheit der Daten, der Übertragbarkeit der Ergebnisse und der Einhaltung der Anforderungen der regulierten Finanzinfrastruktur zusammenhängen.

Analyse complète de l'applicabilité des methodes de détection des DDOS-attacks sur l'infrastructure SDN des entreprises financiers, compte tenu de la base réglemente russe actuelle et des données open source

Résumé: Est examinée la problématique de l'évaluation de l'applicabilité des méthodes de la détection des DDoS dans les infrastructures SDN des organisations financières. L'actualité de cette recherche tient à la haute importance des attaques de type «refus de service» pour garantir l'accessibilité des services numériques, ainsi qu'à la haute sensibilité des contrôleurs et des canaux de commande dans les réseaux définis par programme. Est effectuée une analyse comparative des méthodes d'apprentissage automatique, d'apprentissage profond et des modèles d'ensembles selon trois groupes de critères: qualité de détection, réproductibilité et applicabilité réglementaire et opérationnelle. Est démontré que les méthodes de la famille Random Forest et les ensembles similaires à XGBoost offrent un équilibre rationnel entre précision, explicabilité, vitesse d'inference et facilité d'intégration dans les systèmes SIEM/SOC. Est noté que les modèles de profondeur les plus complexes peuvent afficher des performances élevées en laboratoire, mais sont inférieurs aux méthodes d'ensembles interprétables en termes de répétabilité, audibilité et maturité opérationnelle. Est conclu qu'il est nécessaire d'évaluer les méthodes de détection des DDoS non seulement par Accuracité et F1-score, mais aussi selon un ensemble de critères liés à la transparence des données, à la portabilité des résultats et à la conformité aux exigences des infrastructures financières réglementées.

Авторы: ***Бритвина Валентина Валентиновна*** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Инфокогнитивные технологии», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»; доцент кафедры «Прикладная математика», АНО ВО «Московский университет «Синергия», Москва, Российская Федерация; ***Конюхова Галина Петровна*** – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах», *ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*, Москва, Российская Федерация; ***Боброва Екатерина Олеговна*** – старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»; ***Иванов Михаил Александрович*** – студент, Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация; ***Гусев Артем Олегович*** – студент, Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация; ***Мекшенева Жанна Вячеславовна*** – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Прикладная математика», АНО ВО «Московский университет «Синергия», Москва, Российская Федерация; ***Дубровина Оксана Васильевна*** – преподаватель, Многопрофильный колледж, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 66.096.5
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.452-461

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕЖФАЗНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

© А. В. Сажин[1] ✉, И. С. Гуданов[1], Д. С. Долгин[1], А. А. Ватагин[1], А. Е. Лебедев[1]

[1] *Кафедра «Технологические машины и оборудование», sasha-sazhin@inbox.ru; ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация*

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика; катализатор; математическая модель; псевдоожижение; симуляция.

Аннотация: Исследование направлено на совершенствование методов вычислительной гидродинамики для моделирования процессов псевдоожижения. Проведен сравнительный анализ встроенных моделей сопротивления, реализованных в программном комплексе Ansys Fluent. На основе экспериментальных данных и известных теоретических зависимостей разработана усовершенствованная модель межфазного взаимодействия. Основное преимущество предложенной модели – способность воспроизводить реалистичное распределение фаз в псевдоожиженном слое. Практическая значимость модели продемонстрирована на примере симуляции псевдоожижения микросферического катализатора каталитического крекинга в цилиндрическом аппарате.

Введение

Техника псевдоожиженного слоя на основе многочисленных преимуществ при переработке и транспорте твердых материалов, а также при переработке жидкостей находит применение в разнообразных отраслях промышленности [1]. Псевдоожиженным называют состояние двухфазной системы (твердые частицы – газ или жидкость), которое характеризуется перемещением твердых частиц друг относительно друга. Под псевдоожижением понимают превращение слоя зернистого материала в псевдогомогенную систему под воздействием ожижающего агента. При этом двухфазная псевдогомогенная система получила название псевдоожиженного (кипящего) слоя [2].

Широкое применение процесса псевдоожижения обусловлено следующими преимуществами: интенсивным перемешиванием твердой фазы, что способствует выравниванию температур и концентраций по объему псевдоожиженного слоя; высокими значениями коэффициентов эффективной теплопроводности и теплоотдачи от двухфазной системы к поверхностям теплообмена, что позволяет экономить объемы аппаратов и поверхности теплообмена; применением твердых частиц малых размеров, что повышает удельную поверхность твердой фазы (до 300 $м^2/г$ у современных марок микросферического катализатора каталитического крекинга); текучесть такой системы позволяет вести процесс непрерывно.

Процесс псевдоожижения реализован в нефтеперерабатывающей (каталитический крекинг, гидроочистка, полимеризация, коксование), химической (производство полиолефинов, синтез каучуков, производство хлора), энергетической (сжигание твердого топлива в кипящем слое), металлургической (обжиг руд) и фармацевтической (сушка гранул, порошков) промышленности. Наибольшее распространение псевдоожижение получило в технологии каталитического крекинга применительно к микросферическому катализатору.

Одним из ключевых направлений в современной нефтеперерабатывающей промышленности является оптимизация существующих процессов и аппаратов, а также создание нового технологического оборудования повышенной эффективности. Для достижения этой цели в процессах, использующих псевдоожиженный слой, таких как регенерация катализатора каталитического крекинга, необходимо лучшее понимание особенностей гидродинамики дисперсного слоя. Для лучшего теоретического понимания физической картины двухфазного течения «газ – твердое тело» в качестве инструмента для детального изучения процесса, повышения эффективности регенерации катализатора и создания аппаратов новой конструкции может быть использовано численное моделирование. Для моделирования состояния подобных систем хорошо зарекомендовали программно-вычислительные комплексы (вычислительная гидродинамика (*англ*. Computational Fluid Dynamics (**CFD**)), основанные на методе конечных элементов.

Выделяют два основных подхода описания многофазных потоков: Эйлера–Лагранжа и Эйлера-Эйлера. Первый подход использует гибридное описание: дисперсная фаза, например, твердые частицы, капли и пузыри моделируется как совокупность отдельных частиц, траектории которых отслеживаются в лагранжевой системе отсчета. Несущая фаза (газ или жидкость) описывается как континуум в эйлеровой системе. В рамках второго подхода все фазы (газ, жидкость, твердые частицы) рассматриваются как взаимопроникающие сплошные среды (континуумы). Для каждой фазы решается свой набор уравнений Навье–Стокса, усредненных по объему. Преимущество такого подхода в том, что можно отслеживать траекторию отдельных частиц, их взаимодействие, изменения размеров каждой частицы и т.д. Поэтому для моделирования псевдоожиженных процессов принято использовать метод Эйлера-Эйлера.

Несмотря на достаточно продолжительное и успешное применение метода расчета CFD, до сих пор не создано готовое решение для получения реалистичной картины распределения частиц микросферического катализатора, необходимой для расшивки «узких» мест технологического оборудования. Основной проблемой при моделировании является использование правильных зависимостей при расчете коэффициента сопротивления в определенных зонах аппарата. Однако развитие вычислительных мощностей позволяет вплотную подойти к решению поставленного вопроса.

Цель работы – исследование и совершенствование моделей межфазного сопротивления, встроенных в расчетные модули программы Ansys, и выявление их недостатков. На основе полученных данных необходимо построить собственную модель сопротивления, которая соответствует реальной картине распределения твердой фазы по объему модели.

Ansys Fluent – это ведущий коммерческий программный пакет для CFD, использующий решатель, основанный на методе конечных элементов, для моделирования широкого спектра задач механики жидкости и газа, тепломассообмена и химических реакций. Программа предоставляет комплексную среду для построения геометрии, генерации сеток, настройки физических моделей (таких как турбулентность, многофазные потоки, горение и пр.) и проведения расчетов с последующей визуализацией результатов. Благодаря высокой точности и обширно-

му набору верифицированных моделей, Fluent является стандартом индустрии для инженерного анализа и оптимизации процессов в аэрокосмической, автомобильной, энергетической и химической отраслях.

Математическое моделирование процесса псевдоожижения

В качестве исследуемого объекта выбран двухмерный цилиндрический аппарат. Диаметр аппарата равен 0,5 м, высота – 4 м.

Для дискретизации расчетной области применена структурированная прямоугольная сетка, состоящая из 20 000 равномерных ячеек. Разбиение осуществлено на 200 элементов по высоте и 100 элементов по диаметру аппарата. Также на этом этапе заданы граничные условия граничным линиям аппарата: нижняя граница – вход газа (inlet), верхняя – выход газа с унесенным катализатором (outlet), боковые стороны – стенки (walls). Для большей наглядности и проверки работоспособности моделей расчет проводился в двух скоростных режимах газовой фазы с шагом 0,2 м/с.

После настройки модели необходимую выбрать требуемую модель сопротивления. В качестве встроенных в программный комплекс Ansys Fluent моделей расчета коэффициента сопротивления выбраны наиболее популярные: Syamlal–O'Brien и Gidaspow.

Приведем основные настройки модели (параметры CFD симуляции):

Модель	Granular
Решатель	Pressure-Based Transient
Временной шаг, с	0,01
Максимальное число итераций	40
Критерий сходимости	1×10^{-3}
Максимальная объемная доля твердой фазы	0,6
Насыпная плотность катализатора, кг/м^3	1500
Диаметр частицы катализатора, мкм	60
Коэффициент сопротивления	0,95
Модель турбулентности	K – ε model
Начальная высота катализатора в аппарате, м	1
Скорость газа на входе в аппарат, м/с	0,4; 0,6

В первом опыте используется модель сопротивления Syamlal–O'Brien [3].

Коэффициент межфазного обмена импульсом определяется по формуле

$$\beta = \frac{3\rho_g \alpha_g \alpha_p}{2v_{r,p}^2 d_p} C_D \left| \vec{u}_p - \vec{u}_g \right|, \qquad (1)$$

где ρ_g – плотность газовой фазы, кг/м^3; α_g, α_p – объемные доли газа и твердой фазы соответственно; $v_{r,p}$ – предельная скорость твердых частиц, м/с; d_p – диамнтр твердых частиц, м; C_D – коэффициент сопротивления; $\vec{u}_p, \vec{u}_g$ – скорости твердых частиц и газа соответственно, м/с.

Коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле

$$C_D = \left(0{,}63 + \frac{4{,}8}{\sqrt{\mathrm{Re}_p / u_{r,p}}} \right)^2, \qquad (2)$$

где Re – критерий Рейнольдса.

Критерий Рейнольдса вычисляется по формуле

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho_g d_p \left| \vec{u}_p - \vec{u}_g \right|}{\mu_g}, \tag{3}$$

где μ_g – динамическая вязкость газовой среды, Н·с/м^2.

Предельная скорость твердых частиц определяется по формуле

$$v_{r,p} = 0{,}5\left(A - 0{,}06\,\mathrm{Re}_p + \sqrt{(0{,}06\,\mathrm{Re}_p)^2 + 0{,}12\,\mathrm{Re}_p(2B + A) + A^2} \right), \tag{4}$$

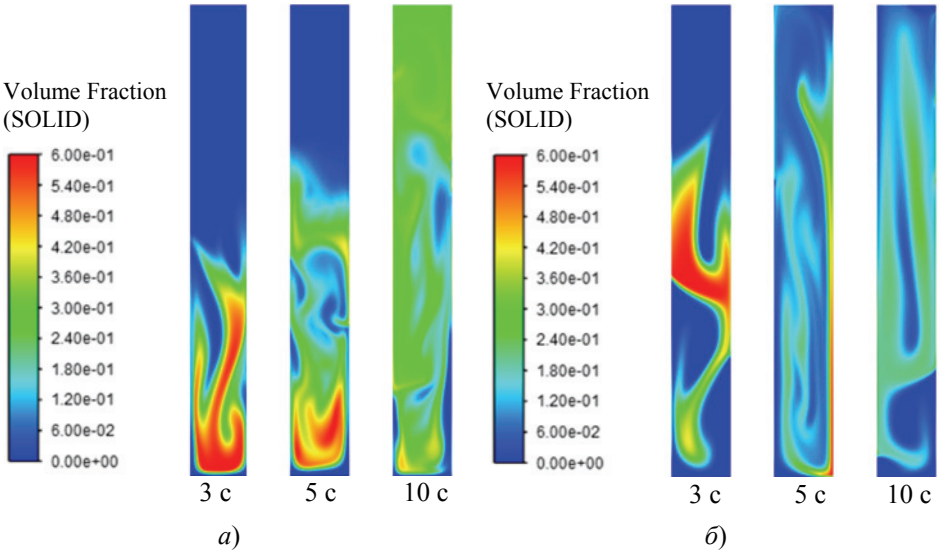
где A, B, P, Q – параметры модели сопротивления Syamlal–O'Brien (5):

$$A = \alpha_g^{4{,}14}; \quad B = \begin{cases} P\alpha_g^{1{,}28}\left(\alpha_g \le 0{,}85\right) \\ \alpha_g^{Q}\left(\alpha_g > 0{,}85\right); \end{cases} \quad P = 0{,}8; \quad Q = 2{,}65. \tag{5}$$

На рисунке 1 изображены результаты опыта с использованием модели Syamlal–O'Brien [3].

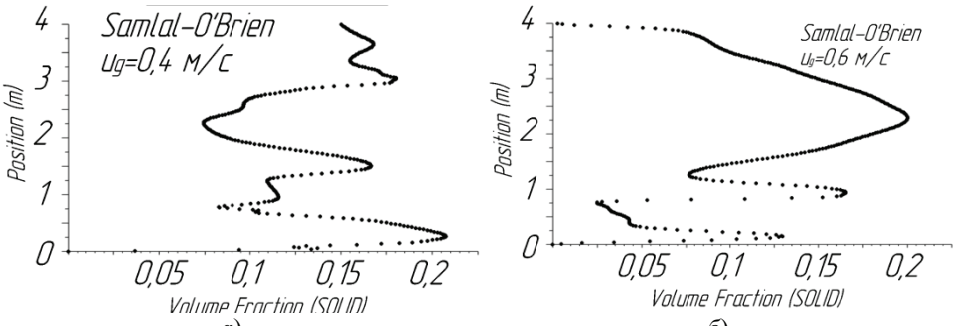
Анализируя результаты, наблюдаем отсутствие четкого разделения фаз, характерных для псевдоожиженного слоя. Течение характеризуется быстрым псевдоожижением и значительным уносом катализатора.

На рисунке 2 показано распределение твердой фракции по высоте аппарата с использованием модели Syamlal–O'Brien. Согласно экспериментальным данным, видно, что концентрация катализатора в нижней зоне значительно ниже требуемой, а в верхней – выше (рис. 3). По данным исследований [4], отклонения от экспериментальных данных в модели Syamlal–O'Brien связаны с завышением прогноза обмена импульсами между газовой и твердой фазами для мелких частиц. Происходит это из-за пренебрежения силами сцепления и агломерации между частицами. Поэтому уравнения Syamlal–O'Brien не могут быть использованы для предсказания и моделирования гидродинамики микросферических частиц катализатора.



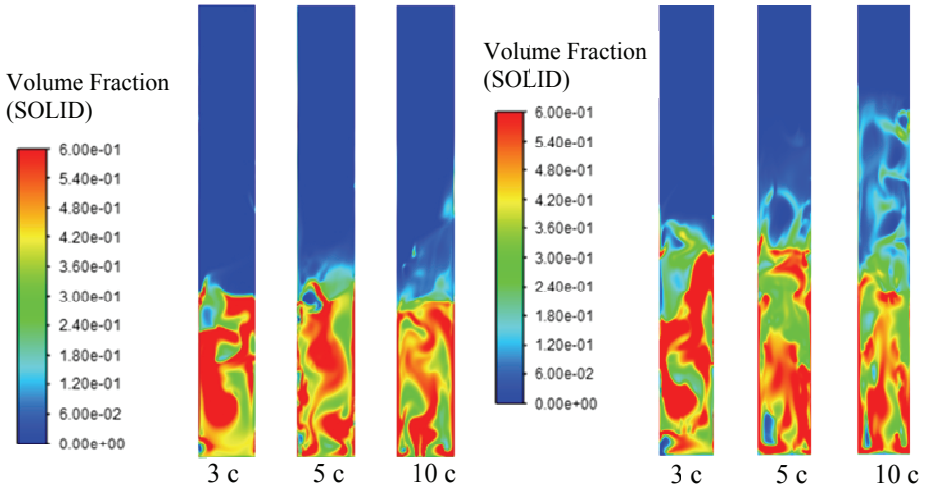
а) *б*)

Рис. 1. Структура потока с классической моделью сопротивления Syamlal–O'Brien при различных скоростях газовой фазы:
а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с



а) *б*)

Рис. 2. Профиль распределения твердой фракции по высоте колонны с классической моделью сопротивления Syamlal–O'Brien при различных скоростях газовой фазы:
а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с



а) *б*)

Рис. 3. Структура потока с четырехзонной моделью сопротивления при различных скоростях газовой фазы:
а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с

Приступим ко второму опыту. В эксперименте в качестве модели для расчета коэффициента сопротивления используется модель Gidaspow [5]. Остальные параметры расчета модели прежние.

Модель сопротивления Gidaspow использует различные формулы для расчета коэффициента межфазного обмена в зависимости от объемной доли газовой фазы в каждой расчетной точке.

Коэффициент межфазного обмена импульсом определяется по формуле:

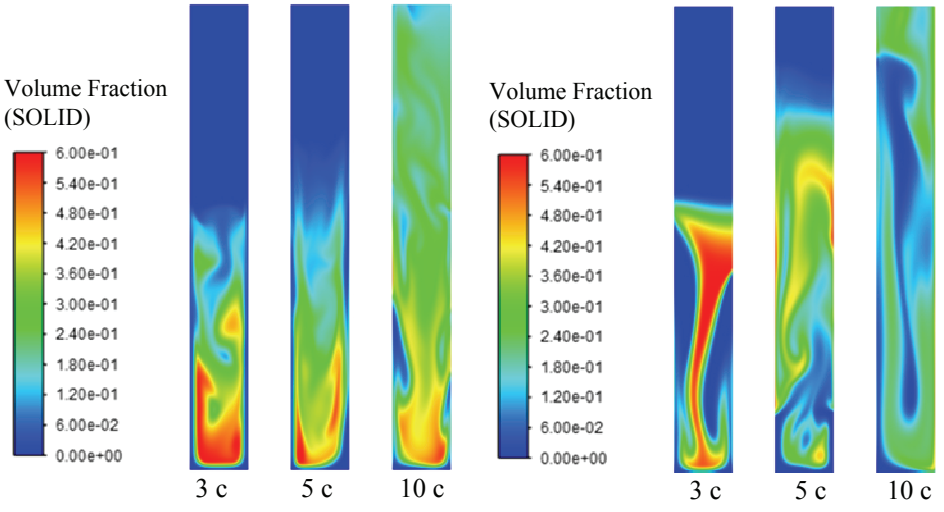
$$\begin{cases} \beta = 150\dfrac{\mu_g(1-\alpha_g)\alpha_p}{\alpha_g d_p^2} + \dfrac{\rho_g \alpha_p \left|\vec{u}_p - \vec{u}_g\right|}{d_p}, & \text{если} \quad \alpha_g \le 0{,}8\,; \\ \beta = \dfrac{3}{4} C_D \dfrac{\rho_g \alpha_g \alpha_p \left|\vec{u}_p - \vec{u}_g\right|}{d_p} \alpha_g^{-2{,}65}, & \text{если} \quad \alpha_g > 0{,}8\,. \end{cases} \tag{6}$$

Коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле

$$C_D = \begin{cases} \dfrac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1 + 0{,}15\,\mathrm{Re}_p^{0{,}687}\right) & (\mathrm{Re} \le 1000); \\ 0{,}44 & (\mathrm{Re} > 1000). \end{cases} \qquad (7)$$

Анализируя результаты расчета потока, с использованием модели Gidaspow видим, что модель имеет аналогичные с моделью Syamlal–O'Brien проблемы: отсутствует образование плотной фазы, а концентрация катализатора в разбавленной фазе избыточная (рис. 4, 5).

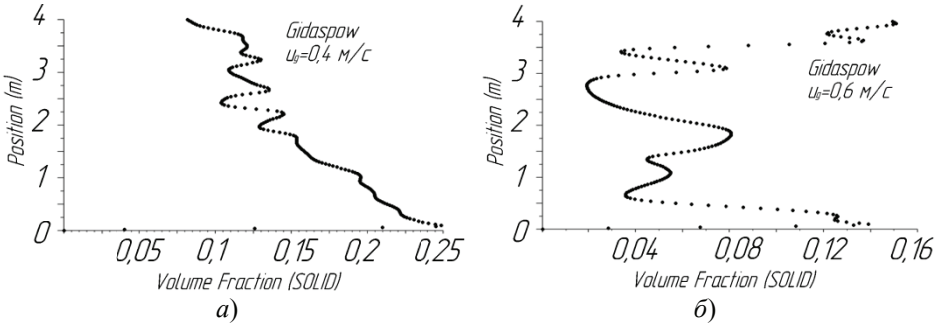
Псевдоожиженный слой микросферического катализатора характеризуется двумя основными областями: плотной и разбавленной, и двумя промежуточными областями: субплотной и субразбавленной [6]. Существующие модели не способны продемонстрировать сосуществование основных фаз, поэтому для корректного моделирования псевдоожижения мелкосферического катализатора требуется строгое определение расчетных зон и выбор соответствующих уравнений. В качестве решения предложена комбинированная четырехзонная модель сопротивления (табл. 1).



а) *б*)

Рис. 4. Структура потока с классической моделью сопротивления Gidaspow при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с



а) *б*)

Рис. 5. Профиль распределения твердой фракции по высоте колонны с классической моделью сопротивления Gidaspow при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с

Таблица 1

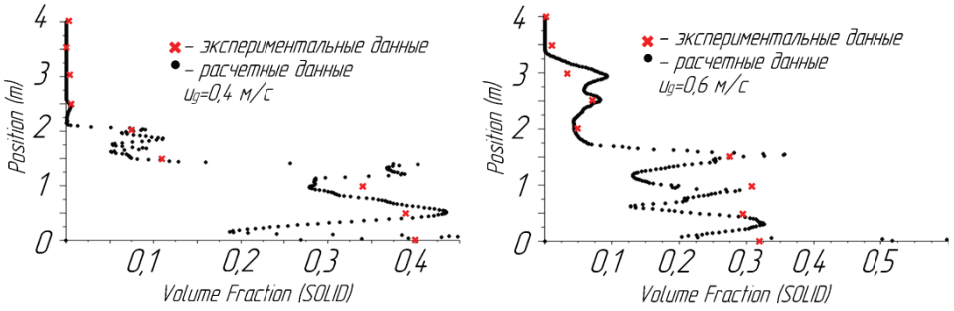
Четырехзонная модель сопротивления

Объемная доля газа	Модель, взятая за основу	Коэффициент сопротивления
$\le 0{,}80$	Ergun	$\beta_1 = 150\frac{\mu_g(1-\alpha_g)\alpha_p}{\alpha_g\left(d_p^*\right)^2} + 1{,}75\frac{\rho_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p^*}$
0,8…0,933	ZP	$\beta_2 = \frac{5}{72}C_D\frac{\rho_g\alpha_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p^*(1-\alpha_g)^{0,293}};$ $C_D = \begin{cases}\frac{24}{\mathrm{Re}_p^*}\left(1+0{,}15\mathrm{Re}_p^{*0,867}\right) & (\mathrm{Re}\le 1000);\\ 0{,}44 & (\mathrm{Re}>1000);\end{cases}$ $\mathrm{Re}_p^* = \frac{\alpha_g\alpha_p d_p^*\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{\mu_g}$
0,933…0,990	Wen & Yu	$\beta_3 = \frac{3}{4}C_D\frac{\rho_g\alpha_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p}\alpha_p^{-2,65}$
0,99…1,00	Schiller & Naumann	$\beta_4 = \frac{3}{4}C_D\frac{\rho_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p};$ $C_D = \begin{cases}\frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1+0{,}15\mathrm{Re}_p^{0,687}\right) & (\mathrm{Re}_p\le 1000)\\ 0{,}44 & (\mathrm{Re}_p>1000)\end{cases}$

Данная модель использует четыре модели расчета в зависимости от объемной доли газа α_g в каждой ячейке. Она включает плотную ($\alpha_g \le 0{,}80$), субплотную ($\alpha_g = 0{,}8\ldots0{,}933$), субразбавленную ($\alpha_g = 0{,}933\ldots0{,}990$) и разбавленную ($\alpha_g = 0{,}99\ldots1{,}00$) зоны. Поскольку изменения коэффициента лобового сопротивления в этой системе проходят ступенчато (от одной формуле к другой), то могут наблюдаться проблемы с численной сходимостью. Чтобы решить эту проблему, необходимо использовать корреляционное уравнение со специальным сшивающим коэффициентом φ. Для реализации данной математической модели была создана пользовательская функция UDF на языке программирования C.

Формулы для расчета корреляционного уравнения и сшивающего коэффициента предоставлены ниже:

$$\beta = (1-\varphi_1)\beta_1 + \varphi_1\left((1-\varphi_2)\beta_2 + \varphi_2\left((1-\varphi_3)\beta_3 + \varphi_3\beta_4\right)\right); \qquad (8)$$



а) *б*)

Рис. 6. Профиль распределения твердой фракции по высоте колонны при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с

$$\varphi_i = \frac{\arctan\left(150 \cdot 1{,}75\left(\alpha_g - \alpha_i\right)\right)}{\pi} + 0{,}5\,, \tag{9}$$

где $\alpha_i = \alpha_{1,2,3}$; $\alpha_1 = 0{,}8$; $\alpha_2 = 0{,}933$; $\alpha_3 = 0{,}99$.

Результаты и обсуждения

Анализируя рисунок 3 видно, что при скорости газовой фазы u_g = 0,4 м/с на 5-й с моделирования происходит образование разбавленной фазы, а на 10-й с расчета – и плотная, и разбавленная фазы четко сформированы. При скорости газовой фазы u_g = 0,6 м/с наблюдаем аналогичную ситуацию. На рисунке 6 крестами отмечены экспериментальные данные, а точками – полученные расчетным путем. Наблюдаем практически идентичное распределение у модели и эксперимента, что показывает корректность проведенного расчета процесса псевдоожижения. При начальной высоте слоя, равной 1 м, высота стабильного плотного слоя в первом случае (u_g = 0,4 м/с) примерно равна 1,25 м, а во втором случае (u_g = 0,6 м/с) – около 1,5 м. Средняя высота разбавленной фазы равна 0,5 и 1,75 м соответственно. Распределение объемных долей твердой фракции по фазам следующее: при u_g = 0,4 м/с в плотной фазе 0,37, в разбавленной 0,1; при u_g = 0,46 м/с в плотной фазе 0,3, в разбавленной 0,08.

Заключение

В работе исследованы встроенные в программу Ansys Fluent модели сопротивления: Syamlal–O'Brien и Gidaspow. Исследование показало, что модели не могут быть использованы для моделирования процесса псевдоожижения применительно к микросферическому катализатору каталитического крекинга. Также предложена и протестирована собственная, модифицированная модель сопротивления, соответствующая реальной картине распределения твердой фазы по объему расчетного аппарата. Четырехзонная модель расчета коэффициента сопротивления может быть использована для проектирования нового и усовершенствования действующего технологического оборудования, исключающего образования застойных зон и «узких» мест.

Список литературы

1. Беранек, Я. Техника псевдоожижения / Я. Беранек, Д. Сокол ; пер. с чешского В. Г. Айнштейна ; под ред. Н. И. Гельперина. – Москва : Гостоптехиздат, 1962. – 160 с.
2. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдоожижения / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша ; под ред. Н. И. Гельперина. – Москва : Химия, 1967. – 664 с.
3. Syamlal, M. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed / M. Syamlal, T. J. O'Brien // AIChE Symposium Series. – 1989. – Vol. 85, No. 1. – P. 22–31.
4. McKeen, T. Simulation and Experimental Validation of a Freely Bubbling Bed of FCC Catalyst / T. McKeen, T. Pugsley // Powder Technology. – 2003. – Vol. 129, No. 1-3. – P. 139–152. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00294-2
5. Gidaspow, D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description / D. Gidaspow. – New York : Academic Press, 1994. – 467 p.
6. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed Risers: A Review / F. Berruti, J. Chaouki, L. Godfroy, T. S. Pugsley, G. S. Patience // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1995. – Vol. 73. – P. 579–602. doi: 10.1002/CJCE.5450730502

Research and Improvement of Interfacial Resistance Models for Numerical Simulation of Fluidized Bed

© A. V. Sazhin[1] ✉, I. S. Gudanov[1], D. S. Dolgin[1], A. A. Vatagin[1], A. E. Lebedev[1]

[1] *Department of Technological Machines and Equipment, sasha-sazhin@inbox.ru; Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: computational fluid dynamics; catalyst; mathematical model; fluidization; simulation.

Abstract: The study aims to improve computational fluid dynamics methods for modeling fluidization processes. A comparative analysis of built-in resistance models implemented in the Ansys Fluent software package has been conducted. Based on experimental data and known theoretical relationships, an improved model of interfacial interaction has been developed. The main advantage of this model is its ability to reproduce a realistic phase distribution in a fluidized bed. The practical significance of the model has been demonstrated through the simulation of fluidization of a microspherical catalyst for catalytic cracking in a cylindrical apparatus.

References

1. Beranek Ya., Sokol D.; Gel'perin N.I. (Ed.), *Tekhnika psevdoozhizheniya* [Fluidization Technique], Moscow: Gostoptekhizdat, 1962, 160 p. (In Russ.)
2. Gel'perin N.I. (Ed.), Aynshteyn V.G., Kvasha V.B. *Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya* [Fundamentals of Fluidization Technique], Moscow: Khimiya, 1967, 664 p. (In Russ.)
3. Syamlal M., O'Brien T.J Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed, *AIChE Symposium Series*, 1989, vol. 85, no. 1, pp. 22-31.
4. Gidaspow D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description*, New York : Academic Press, 1994, 467 p.

5. McKeen T., Pugsley T. Simulation and Experimental Validation of a Freely Bubbling Bed of FCC Catalyst, *Powder Technology*, 2003, vol. 129, no. 1-3, pp. 139-152. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00294-2

6. Berruti F., Chaouki J., Godfroy L., Pugsley T.S., Patience G.S. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed Risers: A Review, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1995, vol. 73, pp. 579-602. doi: 10.1002/CJCE.5450730502

Forschung und Verbesserung von Grenzflächenwiderstandsmodellen für die numerische Simulation des Fließbetts

Zusammenfassung: Ziel dieser Studie ist die Verbesserung von CFD-Methoden (Computational Fluid Dynamics) zur Modellierung von Fluidisierungsprozessen. Es ist eine vergleichende Analyse der in der Software Ansys Fluent implementierten Widerstandsmodelle durchgeführt. Basierend auf experimentellen Daten und bekannten theoretischen Zusammenhängen ist ein verbessertes Modell für die Phaseninteraktion entwickelt. Der Hauptvorteil des vorgeschlagenen Modells liegt in seiner Fähigkeit, eine realistische Phasenverteilung in einem Wirbelschichtbett abzubilden. Die praktische Relevanz des Modells ist am Beispiel der Simulation der Fluidisierung des mikrosphärischen Katalysators für das katalytische Cracken in einer zylindrischen Apparatur demonstriert.

Étude et amélioration des modèles de résistence interphasée pour la modélisation numérique de la couche pseudo-fluidisé

Résumé: L'étude vise à perfectionner les méthodes d'hydrodynamique numérique pour la modélisation des processus de liquéfaction pseudo-fluid. Est effecuée une analyse comparative des modèles de résistance intégrés, réalisés dans le logiciel Ansys Fluent. A la base des données expérimentales et des dépendances théoriques connues, est développé un modèle amélioré d'interaction interphasique. Le principal avantage du modèle proposé réside dans sa capacité à reproduire une répartition réaliste des phases dans une couche pseudo-liquide. Est démontrée la pertinence pratique du modèle par la simulation de la liquéfaction pseudo-liquide d'un catalyseur microsphérique pour le cracking catalytique dans un appareil cylindrique.

Авторы: ***Сажин Александр Валентинович*** – аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Гуданов Илья Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование»; ***Долгин Дмитрий Сергеевич*** – старший преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Ватагин Александр Александрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Лебедев Антон Евгеньевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация.

УДК 697.942.4
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.462-471

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СОПЛА В УСТРОЙСТВЕ ПНЕВМОИМПУЛЬСНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ

© А. С. Ткаченко[1], С. Ю. Панов[2], М. Химвинга[3], Е. А. Шипилова[4] ✉

[1] *ООО «Аспекс Машиностроительная Компания», Москва, Российская Федерация;*
[2] *кафедра прикладной математики и механики, ФГБОУ ВО «ВГТУ», Воронеж, Российская Федерация;*
[3] *кафедра экологической инженерии, Коппербелтский Университет, Китве, Замбия;*
[4] *кафедра математики, elen_ship@list.ru;*
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация

Ключевые слова: пневмоимпульсная очистка; расположение сопла; рукавные фильтры.

Аннотация: Рассмотрена задача определения оптимального расположения сопла над горловиной рукавного фильтра при проектировании и эксплуатации пневмоимпульсной регенерации. Проведено сравнение данных по расположению сопла, рассчитанных по известным математическим зависимостям с характеристиками эффективно работающих систем регенерации промышленных рукавных фильтров. Показано, что математические зависимости корректно описывают частные случаи конструктивных решений устройств пневмоимпульсной очистки фильтровальных элементов.

Введение

В настоящее время активно увеличивается доля применения рукавных фильтров с импульсной продувкой для высокоэффективного обеспыливания аспирационных и технологических выбросов в разных отраслях промышленности [1 – 4]. Фильтровальные элементы обычно выполняют либо цилиндрическими рукавами, натянутыми на металлический каркас, либо в форме картриджей со складчатой структурой фильтровальной ткани.

В процессе эксплуатации фильтровальные элементы накапливают уловленную пыль, увеличивая гидравлическое сопротивление, что приводит к снижению эффективности и нестабильной работе оборудования, неспособности поддерживать параметры аспирационных систем. Соответственно вопрос надежности работы системы регенерации является очень важным при эксплуатации рукавных фильтров. При импульсной струйной очистке обратный поток чистого сжатого воздуха выдувает пыль с поверхности каждого рукава, восстанавливая его пропускную способность. При этом окружающий воздух захватывается струйным потоком, выходящим из инжекционного сопла (из-за напряжения сдвига на границе струйного потока), прежде чем направиться внутрь фильтрующего элемента. Актуальной задачей автоматического управления данным процессом является выбор оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров.

Теоретический анализ проблемы

Один из важных параметров импульсной очистки – расстояние струи – обычно определяется как расстояние между выходным отверстием инжекционного сопла и отверстием фильтрующих элементов (рис. 1).

Если сопло расположено слишком близко к отверстию фильтрующего элемента, у струйного потока меньше шансов захватить окружающий воздух, и он даже может захватывать воздушный поток, проходящий через фильтрующие элементы, что противоположно направлению потока очистки. В результате через фильтрующий материал проникает запыленный воздух. В течение нескольких циклов регенерации вокруг верхней части фильтровального элемента образуется слой осадка [5], что повышает вероятность выхода фильтра из строя.

Оптимальное расстояние определяют, строя график зависимости минимального давления, создаваемого соплом, от расстояния между соплом и открытым краем фильтровального элемента [6]. Точка, в которой эта линия пересекается с осью горловины фильтровального элемента, соответствует оптимальному расстоянию от сопла до свечи (см. рис. 1).

Если сопло расположено слишком далеко от отверстия фильтрующего элемента, потенциал очистки может быть уменьшен, поскольку чрезмерное расширение струи может привести к тому, что не вся струя попадет в фильтрующий элемент [6]. Когда расстояние между импульсными струями составляет 150…250 мм, пиковое давление повышается с увеличением расстояния между импульсными струями и остается примерно таким же, если расстояние между импульсными струями составляет 250…300 мм [7].

Считается, что сопротивление пылевого слоя минимально, когда сопло расположено на оптимальном расстоянии от отверстия фильтрующего элемента [8].

Модель для расчета оптимального расстояния S (рис. 1), полученная с помощью теории струй, которая применялась в исследованиях [9 – 12], выражается уравнением, приведенным в справочнике [13]:

$$S = \frac{(D - d_c)}{2\mathrm{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \tag{1}$$

где D и d_c – диаметры отверстия фильтрующего элемента и выхода инжекционного сопла соответственно; $\alpha \approx 20°$ – угол струи для отношения $S/d_c < 100$.

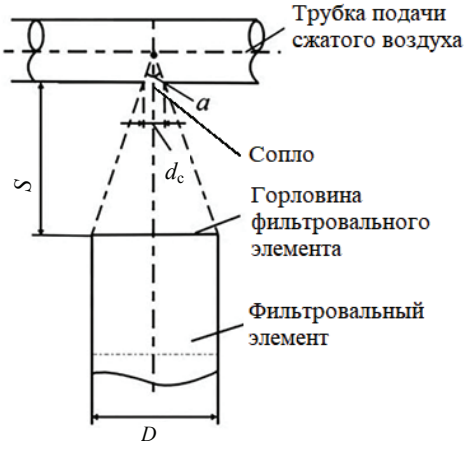


Рис. 1. Схема струйного аппарата системы пневмоимпульсной регенерации

Таблица 1

Зависимости для определения оптимального расстояния от сопла до горловины фильтра

Зависимость	Примечание	Источник
$S = (4...4{,}5)(D - d_c)$ (2)	–	[14]
$S = (3{,}6...4{,}1)(D - d_c)$ (3)		[15]
$S = (D - 48)/0{,}353$ (4)		[16], [17]
$S = (D - d_c)/6{,}8a$ (5)	$a = 0{,}076$ – коэффициент турбулентности	[12]
$S = (D - d_c)\Big/ 2\mathrm{tg}\frac{22{,}43 - 0{,}87d_c + 0{,}11d_c^2}{2}$ (6)	$d_c = 4…25$ мм; $\alpha = 20{,}71…69{,}43°$	[11]
$S = (D - d_c)\Big/ 2\mathrm{tg}\frac{0{,}37275d_c^2 - 1{,}33545d_c + 35{,}95005}{2}$ (7)	$d_c = 5…8$ мм $\alpha = 38{,}58…49{,}13°$	[18]
$S = (D - d_c)\Big/ 2\mathrm{tg}\frac{0{,}089d_c^2 + 0{,}2621d_c + 19{,}586}{2}$;	$D_н/D$: 320/240 мм	[8]
$S = (D - d_c)\Big/ 2\mathrm{tg}\frac{0{,}0699d_c^2 + 0{,}4801d_c + 19{,}093}{2}$;	260/170 мм	
(8)		
$S = (D - d_c)\Big/ 2\mathrm{tg}\frac{0{,}1531d_c^2 + 1{,}179d_c + 26{,}767}{2}$;	240/130 мм	
$S = (D - d_c)\Big/ 2\mathrm{tg}\frac{0{,}1379d_c^2 + 0{,}6593d_c + 24{,}424}{2}$	180/90 мм	

Ряд авторов на основе экспериментальных исследований получили зависимости для определения оптимального расстояния от сопла до горловины фильтра (табл. 1).

Расстояние от среза сопла до смесительной камеры эжектора может быть определено на основании опытных данных из выражения (2) [14]. Исследователи [15] по экспериментальным данным этот же параметр оценивают зависимостью (3). В работе [16] расстояние струи S рассчитано с помощью экспериментальной формулы (4). Данная формула также рекомендуется специалистами компании GOYEN и приводится в их рекламных проспектах [17]. При применении в качестве эжектирующей насадки труб Вентури оригинальной конструкции специалистами компании GOYEN рекомендуется расстояние от отверстия в трубе до горловины насадки 100 мм для трубы диаметром 5 дюймов и 160 мм для трубы 6 дюймов, что приводится в их рекламных проспектах.

Чтобы выявить механизм формирования эффекта очистки импульсно-струйным потоком воздуха в рукавном фильтре, построена теоретическая модель (5) с использованием теории газовой струи и одномерного адиабатического потока в соответствии с заданными характеристиками и размерами рукавов, а также характеристиками сопротивления ткани и пылевого слоя [12].

Для разработки теоретических рекомендаций по проектированию импульсно-струйной регенерации картриджных фильтров исследована оптимальная взаимосвязь расстояния между соплом и отверстием картриджа и диаметром сопла с использованием пикового импульсного давления в качестве показателя эффективности очистки. Их взаимосвязь была проанализирована с точки зрения гидродинамики. Показано, что оптимальное расстояние между струями постепенно увеличивается с уменьшением диаметра сопла, предложена математическая зависимость (6) для оптимизации расстояния между струями S и диаметра сопла [11].

В работе [18] изучены характеристики очистки спеченных пластиковых фильтров при различных параметрах импульсно-струйной очистки: давлении в резервуаре, диаметре сопла и расстоянии до струи (расстоянии между соплом и отверстием фильтра). С увеличением расстояния до струи пиковое давление сначала возрастало, а затем уменьшалось, а с увеличением диаметра сопла оптимальное расстояние до струи постепенно уменьшалось. Математическая зависимость (7) получена в результате подбора кривой.

Влияние диаметра инжекционного отверстия, количества инжекционных отверстий, расстояния до струи и давления в резервуаре на импульсно-струйную очистку изучалось путем измерения статического давления на внутренней стенке картриджа. Это также позволило оптимизировать расстояние до струи, соотношение диаметров отверстий, диаметр инжекционного отверстия и внутренний объем картриджа [8].

Использовались четыре типа картриджей: три с соотношением внешнего $D_н$ и внутреннего D диаметров 320/240 мм, четыре – 260/170 мм, пять – 210/130 мм, шесть – 180/90 мм. Длина всех картриджей – 660 мм. Уравнения, связывающее оптимальное расстояние между струями и диаметр инжекционного отверстия, имеют вид (8). Предпочтительно, чтобы соотношение D/S устройства для сбора пыли, которое определяется диаметром D верхнего отверстия гофрированного фильтра и расстоянием между верхней поверхностью гофрированного фильтра и выпускным отверстием сопла, соответствовало оптимальному соотношению (D/S в диапазоне 0,4…0,5) [19].

Кроме того, в литературе представлено много данных об экспериментальном определении оптимального расстояния от сопла до горловины рукавного фильтра в диапазоне 200…250 мм.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Анализ приведенных уравнений показывает, что расстояние от сопла до горловины фильтровального элемента является функцией разности диаметров горловины и сопла

$$S = f(D - d_с). \tag{9}$$

Если в фильтровальном рукаве установлена эжектирующая насадка в виде трубки Вентури, то за характерный размер диаметра принимается диаметр смесительной камеры эжектора. Если насадки не устанавливаются, то в качестве характерного принимается диаметр входного отверстия фильтровального элемента, например для рукавного элемента – диаметр рукава.

Проведена интерпретация сравнения расчетных данных, полученных по уравнениям, приведенным в табл. 1, с характеристиками эффективно работающих фильтровальных установок реальных производств, как это показано на рис. 2, 3.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают наиболее приближенное совпадение данных промышленный систем с расчетами по формулам (4) и (5) в областях картриджных фильтров малых диаметров (область I) и рукавных фильтров (область II).

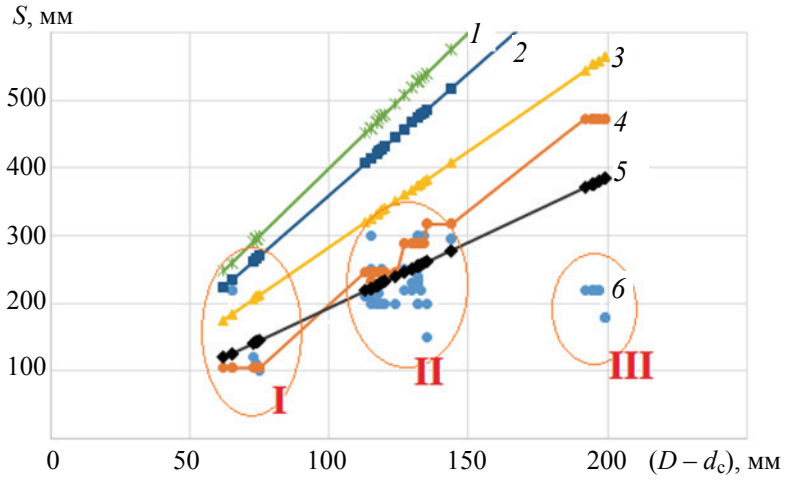


Рис. 2. Зависимости $S = f(D - d_c)$, рассчитанные по формулам:
1 – (2); *2* – (3); *3* – (1); *4* – (4); *5* – (5);
6 – эксплуатационные данные реальных фильтровальных систем

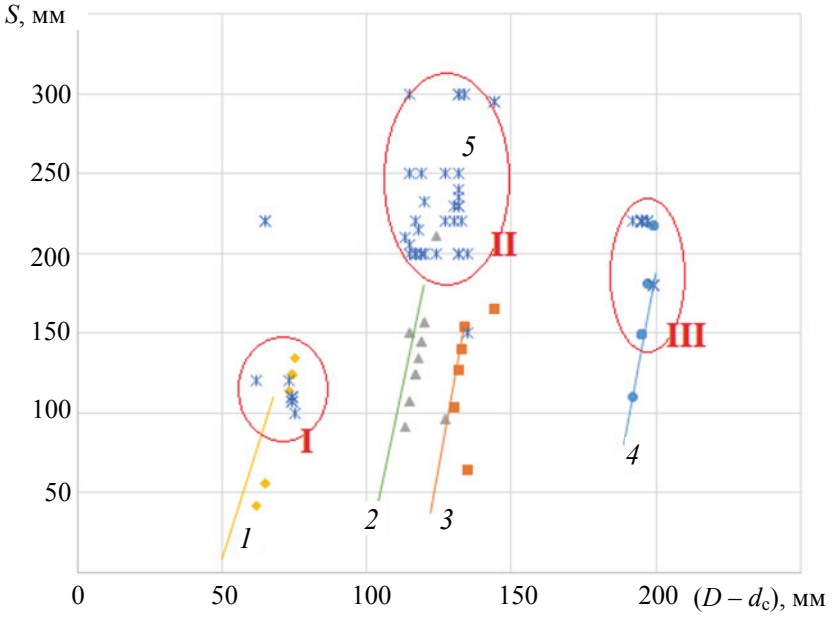
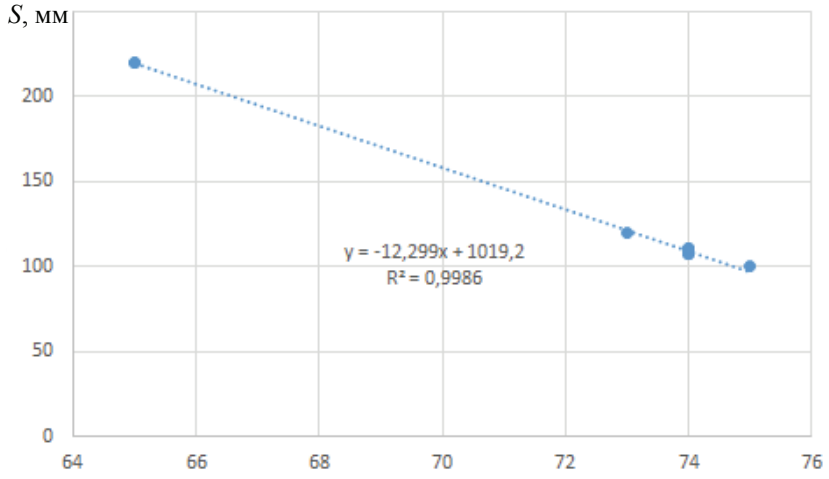


Рис. 3. Зависимости $S = f(D - d_c)$ в сравнении с расчетом по уравнению (8) для фильтровального элемента $D_н/D$:
1 – 320/240 мм; *2* – 260/170 мм; *3* – 210/130 мм; *4* – 180/90 мм;
5 – эксплуатационные данные реальных фильтровальных систем

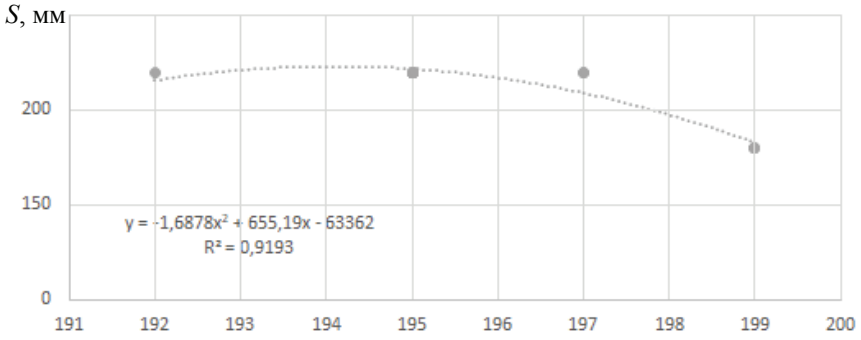
Данные сравнения параметров промышленных систем с расчетом по формулам (8), приведенные на рис. 3, показывают неплохую сходимость в областях картриджных фильтров малых диаметров (область I) и картриджных фильтров больших диаметров (область III).

Проведем корреляционный анализ данных работающих пневмоимпульсных систем регенерации по отдельным группам фильтровальных элементов зависимостями вида (9) (рис. 4).



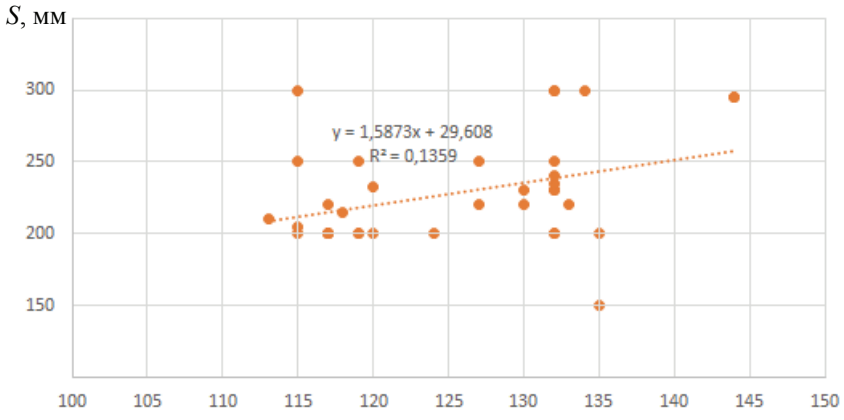
$D - d_c$, мм

а)



$D - d_c$, мм

б)



$D - d_c$, мм

в)

Рис. 4. Зависимости $S = f(D - d_c)$ для фильтровальных элементов картриджных с малым (*а*) и большим (*б*) диаметрами, рукавных (*в*)

Для картриджных фильтров малых диаметров (180 мм) получается корреляционная зависимость с сильной связью и строгой отрицательной корреляцией (r = –0,999). Уравнение линейной регрессии будет иметь наибольшую аппроксимацию R^2 = 0,99 (рис. 4, *а*)

$$S = 1019{,}2 - 12{,}299(D - d_{\text{c}}). \quad (10)$$

Аналогично для картриджей большого диаметра (325 мм) корреляционная зависимость с сильной связью и строгой отрицательной корреляцией (r = –0,83). Уравнение регрессии полинома второй степени имеет высокую аппроксимацию R^2 = 0,919 (рис. 4, *б*)

$$S = -1{,}6878(D - d_{\text{c}})^2 + 655{,}19(D - d_{\text{c}}) - 63362. \quad (11)$$

Исследуемая зависимость для рукавных фильтров (рис. 4, *в*) показывает слабую корреляцию (r = 0,368) и практически несущественную регрессию. Для хорошей аппроксимации требуется определение влияния и других факторов.

При этом следует отметить, что большинство значений находятся в ранее отмеченном оптимальном диапазоне 200…250 мм.

Заключение

Рассмотренные математические зависимости корректно описывают частные случаи конструктивных решений устройств пневмоимпульсной очистки фильтровальных элементов и, соответственно, не могут претендовать на универсальность. Данные зависимости могут быть использованы для предварительного проектирования систем регенерации. Кроме того, почти все исследования были сосредоточены на изучении влияния одного рабочего параметра импульсно-струйного устройства, такого как расстояние между струями и фильтровальным элементом, на эффективную эксплуатацию рукавного/картриджного фильтра. При этом требуется дальнейший анализ и обсуждение взаимодействия параметров, например взаимосвязи между расстоянием между струями и диаметром сопла, диаметром коллектора и начальным давлением в резервуаре и т.д.

Список литературы

1. Старк, С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии = Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве : учебник для вузов / С. Б. Старк. – Москва : Металлургия, 1977. – 328 с.

2. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в черной металлургии / А. И. Толочко, О. В. Филипьев, В. И. Славин, В. С. Гурьев. – Москва : Металлургия, 1986. – 206 с.

3. Обеспыливание промышленных газов в огнеупорном производстве / Ю. В. Красовицкий, П. Б. Балтренас, В. Н. Энтин, Н. М. Анжеуров, В. Ф. Бабкин. – Вильнюс : Техника, 1996. – 363 с.

4. Энергосберегающее пылеулавливание при производстве керамических пигментов по «сухому» способу : монография / В. А. Горемыкин, Ю. В. Красовицкий, С. Ю. Панов, А. В. Логинов. – Воронеж : Изд-во Воронежского государственного университета, 2001. – 296 с.

5. Stephen, C. M. Conditioning and pulse-cleaning of rigid ceramic filters / C. M. Stephen, S. K. Granell, J. P. K. Seville // High Temperature Gas Cleaning. – Institut fur mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Unversitat Karlsruhe (TH), 1996. – P. 207–218.

6. Granell, S. K. Effect of venturi inserts on pulse cleaning of rigid ceramic filters / S. K. Granell, J. P. K. Seville // High Temperature Gas Cleaning. – 1999. – Vol. 2. – P. 96–110.

7. Discussion on influencing factors of the pulse-jet performance of fabric filter / Dang Xiao-qing, Pang Min, Li Xin, Zhang Jing, Li Qian // International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE'2011). – 2011. – P. 1167–1170. doi: 10.1109/ICETCE.2011.5776073

8. Suh, Jeong Min. Influence of pulsing-air injection distance on pressure drop in a coke dust bagfilter / Jeong Min Suh, Young Il Lim, John Zhu // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2010. – Vol. 28, No. 2. – P. 613–619. doi: 10.1007/s11814-010-0372-7

9. Schildermans, I. Pulse jet cleaning of rigid filters: a literature review and introduction to process modeling / I. Schildermans, J. Baeyens, K. Smolders // Filtration + Separation. – 2004. – Vol. 41, No. 5. – P. 26–33. doi: 10.1016/S0015-1882(04)00234-4

10. Influence of injection pipe characteristics on pulse-jet cleaning uniformity in a pleated cartridge filter / Shihang Li, Fubao Zhou, Biao Xie, Fei Wang // Powder Technology. – 2018. – No. 328. – P. 264–274. doi: 10.1016/j.powtec.2018.01.013

11. The optimized relationship between jet distance and nozzle diameter of a pulse-jet cartridge filter / Yunlou Qian, Yuanxia Bi, Qing Zhang, Haiyan Chen // Powder Technology. – 2014. – No. 266. – P. 191–195. doi: 10.1016/j.powtec. 2014.06.004

12. On the Forming Mechanism of the Cleaning Airflow of Pulse-Jet Fabric Filters / Cai Jiying, Hao Wenge, Zhang Cong, Yu Jiaqi // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2017. – Vol. 67, No. 1. – P. 1273–1287. doi: 10.1080/10962247.2017.1311967

13. Perry, R. H. Perry's Chemical Engineers' Handbook / R. H. Perry, D. W. Green. – 6th Edition. – New York : McGraw Hill, 1997. – P. 5–22.

14. Мазус, М. Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / М. Г. Мазус, А. Д. Мальгин, М. Л. Моргулис. – Москва : Машиностроение, 1985. – 240 с.

15. Тукманов, Ю. Н. Технология регенерации металлокерамических фильтров / Ю. Н. Тукманов // Новая техника и технология. – 2003. – С. 664–672.

16. Zhang, D. Y. Pulse-jet Fabric Collector's Handbook / D. Y. Zhang, C. Wang. – Chemical Industry Press, 2011. – 634 p.

17. Blowtube Nozzles and Cartridge Cleaning Cones: Goyen GOCO Series. Product Leaflet. – 2017. – URL : https://image.makewebeasy.net/makeweb/0/hEUFmYNhw/Document/NOZZLES.pdf?v=202012190947 (дата обращения: 25.08.2026).

18. The relationship between peak pressure and parameters of pulse-jet cleaning in a sintered plastic filter / Mei Huang, Cuiping Yan, Chunhong He, Cuiying Tang, Fei Yang, Peng Li // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2021. – Vol. 71, No. 9. – P. 1055–1066. doi: 10.1080/10962247.2020.1860157

19. US8062396B2H. Apparatus for collecting dust and a pleated-type filter therefor / Amano, H. Ikeno, T. Suzuki, H. Watanabe. – Google Patents, 2011. – 19 p.

Determining the Optimal Nozzle Position Pulse-Jet Cleaning Systems for Bag Filters

© A. S. Tkachenko[1], S. Yu. Panov[2], M. Himwinga[3], E. A. Shipilova[4] ✉

[1] *Aspex Machine-Building Company LLC, Moscow, Russian Federation;*
[2] *Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;*
[3] *Department of Environmental Engineering, Copperbelt University, Kitwe, Zambia;*
[4] *Department of Mathematics, elen_ship@list.ru; Air Force Academy named Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation*

Keywords: bag filters; pulse-jet cleaning; nozzle position.

Abstract: The paper addresses the problem of determining the optimal nozzle position above the bag filter throat during the design and operation of pulse-jet regeneration systems. Nozzle position data calculated using established mathematical relationships are compared with the operating parameters of effectively functioning industrial bag-filter regeneration systems. The results show that mathematical relationships adequately describe specific design configurations of pulse-jet cleaning systems for filter elements.

References

1. Stark S.B. *Pyleulavlivaniye i ochistka gazov v metallurgii = Gazoochistnyye apparaty i ustanovki v metallurgicheskom proizvodstve: uchebnik dlya vuzov* [Dust Collection and Gas Purification in Metallurgy = Gas Cleaning Apparatus and Installations in Metallurgical Production: A Textbook for Universities], Moscow: Metallurgiya, 1977, 328 p. (In Russ.)

2. Tolochko A.I., Filip'yev O.V., Slavin V.I., Gur'yev B.C. *Ochistka tekhnologicheskikh i neorganizovannykh vybrosov ot pyli v chernoy metallurgii* [Cleaning Process and Fugitive Emissions from Dust in the Ferrous Metallurgy], Moscow: Metallurgiya, 1986, 206 p. (In Russ.)

3. Krasovitskiy Yu.V., Baltrenas P.B., Entin V.N., Anzheurov N.M., Babkin V.F. *Obespylivaniye promyshlennykh gazov v ogneupornom proizvodstve* [Dedusting Industrial Gases in Refractory Production], Vil'nyus: Tekhnika, 1996, 363 p. (In Russ.)

4. Goremykin V.A., Krasovitskiy Yu.V., Panov S.Yu., Loginov A.V. *Energosberegayushcheye pyleulavlivaniye pri proizvodstve keramicheskikh pigmentov po "sukhomu" sposobu: monografiya* [Energy-saving dust collection in the production of ceramic pigments using the "dry" method: monograph], Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001, 296 p. (In Russ.)

5. Stephen C.M., Granell S.K., Seville J.P.K. Conditioning and pulse-cleaning of rigid ceramic filters, *High Temperature Gas Cleaning*, Institut fur mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Unversitat Karlsruhe (TH), 1996, pp. 207-218.

6. Granell S.K., Seville J.P.K. Effect of venturi inserts on pulse cleaning of rigid ceramic filters, *High Temperature Gas Cleaning*, 1999, vol. 2, pp. 96-110.

7. Dang Xiao-qing, Pang Min, Li Xin, Zhang Jing, Li Qian. Discussion on influencing factors of the pulse-jet performance of fabric filter, *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering* (ICETCE'2011), 2011, pp. 1167-1170. doi: 10.1109/ICETCE.2011.5776073

8. Jeong Min Suh, Young Il Lim, John Zhu. Influence of pulsing-air injection distance on pressure drop in a coke dust bagfilter, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2010, vol. 28, no. 2, pp. 613-619. doi: 10.1007/s11814-010-0372-7

9. Schildermans I., Baeyens J., Smolders K. Pulse jet cleaning of rigid filters: a literature review and introduction to process modeling, *Filtration + Separation*, 2004, vol. 41, no. 5, pp. 26-33. doi: 10.1016/S0015-1882(04)00234-4

10. Shihang Li, Fubao Zhou, Biao Xie, Fei Wang. Influence of injection pipe characteristics on pulse-jet cleaning uniformity in a pleated cartridge filter, *Powder Technology*, 2018, no. 328, pp. 264-274. doi: 10.1016/j.powtec.2018.01.013

11. Yunlou Qian, Yuanxia Bi, Qing Zhang, Haiyan Chen. The optimized relationship between jet distance and nozzle diameter of a pulse-jet cartridge filter, *Powder Technology*, 2014, no. 266, pp. 191-195. doi: 10.1016/j.powtec.2014.06.004

12. Cai Jiying, Hao Wenge, Zhang Cong, Yu Jiaqi. On the Forming Mechanism of the Cleaning Airflow of Pulse-Jet Fabric Filters, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, vol. 67, no. 1, pp. 1273-1287. doi: 10.1080/10962247.2017.1311967

13. Perry R.H., Green D.W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th Edition, New York: McGraw Hill, 1997, pp. 5-22.

14. Mazus M.G., Mal'gin A.D., Morgulis M.L. *Fil'try dlya ulavlivaniya promyshlennykh pyley* [Filters for capturing industrial dusts], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 240 p. (In Russ.)
15. Tukmanov Yu.N. [Regeneration technology of metal-ceramic filters], *Novaya tekhnika i tekhnologiya* [New equipment and technology], 2003, pp. 664-672. (In Russ.)
16. Zhang D.Y., Wang C. *Pulse-jet Fabric Collector's Handbook*, Chemical Industry Press, 2011, 634 p.
17. Blowtube Nozzles and Cartridge Cleaning Cones: Goyen GOCO Series. Product Leaflet, 2017, available at: https://image.makewebeasy.net/makeweb/0/hEUFmYNhw/Document/NOZZLES.pdf?v=202012190947 (accessed 25 August 2026).
18. Mei Huang, Cuiping Yan, Chunhong He, Cuiying Tang, Fei Yang, Peng Li. The relationship between peak pressure and parameters of pulse-jet cleaning in a sintered plastic filter, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2021, vol. 71, no. 9, pp. 1055-1066. doi: 10.1080/10962247.2020.1860157
19. US8062396B2H. Apparatus for collecting dust and a pleated-type filter therefor / Amano, H. Ikeno, T. Suzuki, H. Watanabe. Google Patents, 2011.

Bestimmung der optimalen Düsenposition in einer Vorrichtung zur Pneumoimpulsregeneration für Korbfilter

Zusammenfassung: Diese Arbeit untersucht die Bestimmung der optimalen Düsenposition oberhalb des Filterhalses des Schlauchfilters bei der Auslegung und dem Betrieb des pneumatischen Impulsregenerationssystems. Die mithilfe bekannter mathematischer Beziehungen berechneten Düsenpositionsdaten sind mit den Kennlinien effizienter industrieller Schlauchfilterregenerationssysteme verglichen. Es ist gezeigt, dass die mathematischen Beziehungen spezifische Auslegungslösungen für die pneumatische Impulsreinigung von Filterelementen korrekt beschreiben.

Détermination de l'emplacement optimal de la buse dans le dispositif de régénération par l'impulsion pneumatique des filtres à air

Résumé: Est examinée la problématique de la détermination de l'emplacement optimal du noyau au-dessus du col du filtre-mains lors de la conception et de l'exploitation d'une régénération par impulsions pneumatiques. Est effectuée une comparaison des données sur l'emplacement du noyau, calculées selon des dépendances mathématiques connues, avec les caractéristiques de systèmes de régénération efficaces de filtres-mains industriels. Est démontré que les dépendances mathématiques décrivent correctement les cas particuliers des solutions constructives des dispositifs de nettoyage par impulsions pneumatiques des éléments filtrants.

Авторы: ***Ткаченко Артем Сергеевич*** – главный специалист ООО «Аспекс Машиностроительная Компания», Москва, Российская Федерация; ***Панов Сергей Юрьевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладной математики и механики», ФГБОУ ВО «ВГТУ», Воронеж, Российская Федерация; ***Химвинга Мвине*** – кандидат технических наук, преподаватель кафедры Экологической Инженерии, Коппербелтский Университет, Китве, Замбия; ***Шипилова Елена Алексеевна*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

УДК 519.6
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.472-478

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРАБАННО-ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР ЕГО ПАРАМЕТРОВ

© Л. И. Филинков[1], М. Ю. Таршис[1], Л. В. Королев[2], А. Б. Капранова[1] ✉

[1] *Кафедра «Теоретическая и прикладная механика»; mutarshis@yahoo.com;*
[2] *кафедра «Информационные системы и технологии»,*
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, Российская Федерация

Ключевые слова: барабанно-лопастной смеситель; коэффициент неоднородности; параметры; процесс смешивания; расчет; сыпучие материалы.

Аннотация: Проведены исследования влияния параметров барабанно-лопастного смесителя на качество получаемой смеси. Изучено влияние шага установки лопастей вдоль оси аппарата, радиуса их установки и угла наклона лопасти к плоскости поперечного сечения корпуса смесителя на однородность смеси. Результаты исследований представлены в виде кривых смешивания. Представлена постановка задачи оптимизации параметров смесителя.

Введение

Среди смесителей сыпучих материалов самое широкое применение в различных отраслях промышленного производства находят аппараты барабанного типа, которые распространены в химической промышленности, металлургии, строительном производстве, угольной промышленности, энергетике, производстве керамических изделий, медикаментов и целом ряде других. Это связано с тем, что такие аппараты отличаются низкой энергоемкостью, в силу тихоходности привода, а также сравнительно низкой металлоемкостью и простотой конструкции. Тем не менее получение однородных сыпучих смесей компонентов, частицы которых отличаются по своим физико-механическим свойствам (диаметрам частиц, их плотности, форме и др.) достаточно затруднено из-за процессов сегрегации, сопровождающих основной процесс [1]. Сегрегация смеси в аппаратах барабанного типа связана с тем, что движущиеся частицы меньшего диаметра и (или) большей плотности сосредоточиваются в центре циркуляции смеси, а остальные, в виде эллиптических колец, располагаются на периферии поперечного сечения смеси. Значительного снижения сегрегации можно достичь путем установки дополнительных рабочих органов (лопастей), проходящих через центр сегрегации при работе устройства [1]. За последние годы был разработан и предложен к использованию в производстве ряд новых конструкций таких устройств [2 – 4].

Цель работы – исследование влияния параметров конструкции аппарата барабанно-лопастного типа на качество получаемой смеси и выработка рекомендаций по рациональному проектированию такого устройства.

Описание смесителя и методики проведения эксперимента

На рисунке 1 показана установка для исследования барабанно-лопастного аппарата. Она содержит цилиндрический корпус *1*, внутри которого размещены ступени с рабочими лопастями *2*. Корпус имеет торцевые стенки *3* и *4*. Внутри корпуса *1*, на расстоянии L_p от среза лопасти, могут устанавливаться прозрачные кольцевые перегородки *5*. Загрузка компонентов происходит из бункера *6*, выгрузка – в приемный бункер *7* через патрубок *8*. Привод смесителя (не показан) соединен с опорными валками *9*. Смешиваемые компоненты, находящиеся внутри корпуса *1*, движутся в режиме переката, то есть происходит их подъем и обрушение. Перемешивание компонентов происходит преимущественно в потоке обрушения материала, а также при перетасовке смеси лопастями *2*.

Исследуемые конструктивные параметры смесителя:

$$\left\{L, L_p, \alpha_1, \alpha_2, d_в, D\right\},$$

где L – длина корпуса *1*; L_p – расстояние от среза лопасти до перегородки *5*; α_1, α_2 – углы наклона лопастей к плоскости поперечного сечения рабочей камеры; $d_в = 0{,}23$ м – внутренний диаметр рабочей камеры; $D = 0{,}242$ м. Диапазоны изменения этих параметров: $L = [0{,}01 – 0{,}405]$ м; $L_p = [0{,}01 – 0{,}09]$ м; $\alpha_1 = [8° – 120°]$, $\alpha_2 = [8° – 120°]$.

В качестве критерия оценки однородности сыпучей смеси (выходного параметра) принят коэффициент неоднородности [1]. При исследованиях коэффициент неоднородности смеси определялся бесконтактным методом, после фиксации ее изображения через прозрачную перегородку *5* с последующим его анализом [5, 6]. Для этого последовательно снимаются кольцевые перегородки *5*, и удаляется смесь, находящаяся перед следующей перегородкой. Затем проводился ее анализ по методике [6]. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методом наименьших квадратов с последующим поиском уравнения приближенной регрессии, связывающего коэффициент неоднородности смеси с параметрами смесителя. Для оценки качества аппроксимации, как и в работе [6], использован коэффициент детерминации R^2.

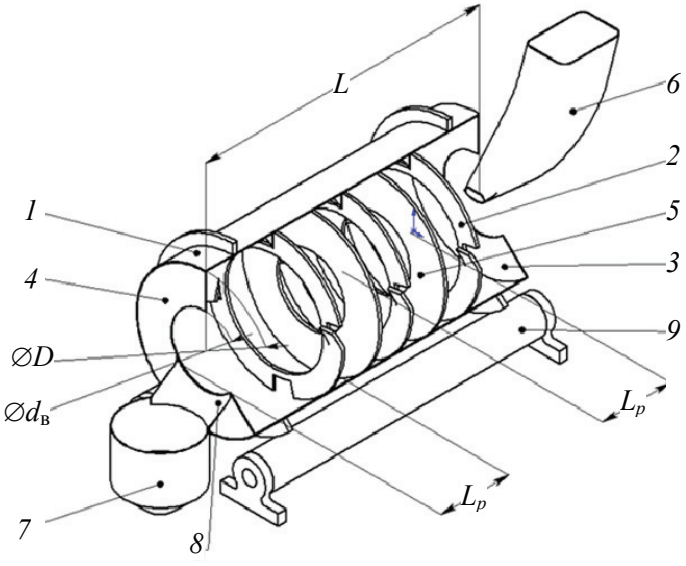


Рис. 1. Схема экспериментальной установки барабанно-лопастного смесителя

Значения коэффициента неоднородности в сечении (слое) на расстоянии L получали по формуле

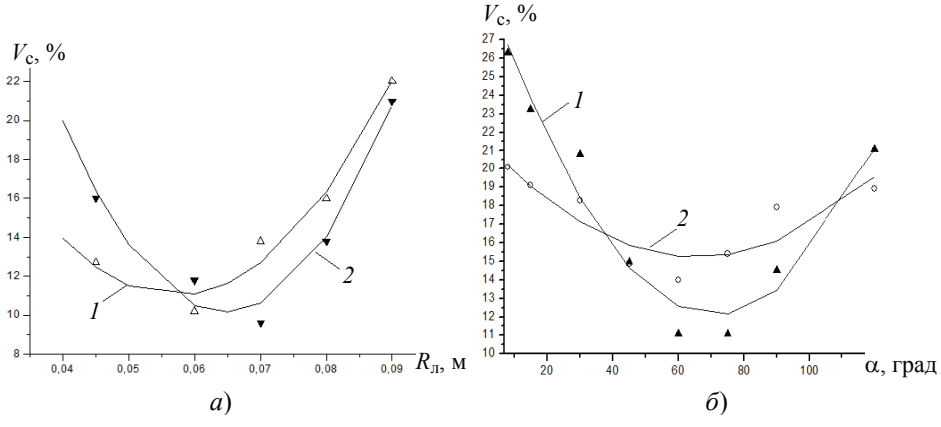
$$V_{CL}^{p} = \frac{1}{\bar{c}_L^{p}} \sqrt{\frac{1}{v_{\text{об}}} \sum_{i=1}^{n} v_i \left(c_{iL}^{p} - \bar{c}_L^{p}\right)^2}, \qquad (1)$$

где $\bar{c}_L^{p} = \dfrac{v^{\text{кл}}}{v_{\text{об}}}$ – средняя по объему концентрация ключевого компонента в поперечном слое сыпучего материала толщиной, равной диаметру наибольшей частицы, $v^{\text{кл}}$ – объем частиц ключевого компонента во всем слое, $v_{\text{об}}$ – объем частиц в слое; $c_{iL}^{p} = \dfrac{v_i^{\text{кл}}}{v_i}$ – концентрация ключевого компонента в i-й пробе – области слоя, $v_i^{\text{кл}}$ – объем частиц ключевого компонента в пробе – области слоя, v_i – объем частиц в пробе – области слоя.

Результаты исследований

Влияние основных конструктивных параметров смесителя на коэффициент неоднородности получаемой смеси $V_{\text{с}}$, отражают зависимости, представленные на рис. 2 и 3. Кривые смешивания построены в результате аппроксимации экспериментальных точек.

Результаты исследований показывают экстремальное влияние радиуса $R_{\text{л}}$ установки лопасти на качество получаемой смеси $V_{\text{с}}$ (см. рис. 2, *а*). Очевидно, это связано с падением однородности смеси при смещении лопасти относительно центра сегрегации сыпучей смеси.



а) *б*)

Рис. 2 Зависимости коэффициента неоднородности смеси (символы – эксперимент, линии – аппроксимация):

а – от радиуса $R_{\text{л}}$ установки лопасти различной высоты при различных значениях концентрации смеси *с* ключевого компонента и соотношении средних диаметров частиц $d_1/d_2 = 0{,}57$: *1* – $c = 0{,}5$; $h = 0{,}03$ м; $V_{\text{с}} = 43{,}9 - 1152{,}9R_{\text{л}} + 10107\,R_{\text{л}}^2$; $R^2 = 0{,}973$; *2* – $c = 0{,}33$; $h = 0{,}02$ м; $V_{\text{с}} = 78{,}03 - 2103R_{\text{л}} + 16290R_{\text{л}}^2$; $R^2 = 0{,}960$;

б – от углов наклона лопасти к плоскости поперечного сечения при различных значениях концентрации ключевого компонента (рапс – просо, $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$): *1* – $c = 0{,}2$; $V_{\text{с}} = 21{,}65 - 0{,}195\alpha + 0{,}00148\alpha^2$; *2* – $c = 0{,}8$; $V_{\text{с}} = 30{,}96 - 0{,}531\alpha + 0{,}00374\alpha^2$

Исследования коэффициента неоднородности смеси V_c устанавливают также экстремальное влияние на него углов наклона перемешивающих лопастей при различных значениях концентрации ключевого компонента (см. рис. 2, *б*.). Очевидно, что при углах α, лежащих вне определенного диапазона, снижается площадь перекрытия и соответственно «захват» «ядра сегрегации».

На рисунке 3, *а* показаны результаты исследований, отражающие поведение коэффициента неоднородности смеси за срезом лопасти на длине L_p. Последствия воздействия лопасти проявляются в росте однородности смеси на участке $L_p = [0{,}06 – 0{,}09]$ м, что связано с ростом эффективности диффузионного смешивания после конвективного воздействия лопастей. Полученный результат (кривая смешивания) имеет значение с точки зрения выбора рациональных размеров смесителя (расстояний между перемешивающими ступенями). Значение параметра L_p определяет шаг установки ступеней с лопастями по длине корпуса смесителя и, следовательно, габариты и металлоемкость аппарата.

На рисунке 3, *б* показаны кривые, отражающие изменение качества смеси в зависимости от расстояния сечения от места загрузки компонентов, то есть от длины смесителя L. Из графика видно, что сначала происходит существенный рост однородности смеси с увеличением длины L корпуса смесителя с последующей стабилизацией коэффициента неоднородности на участке $L = [0{,}15 – 0{,}405]$ м.

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 2, *а*, *б* и 3, *а*, в виде кривых смешивания, которые имеют экстремум коэффициента неоднородности V_c, создают предпосылки для постановки задачи оптимизации конструкции смесителя.

Для решения такой задачи необходимо выбрать критерий оптимизации, который должен быть записан в виде целевой функции параметров смесителя.

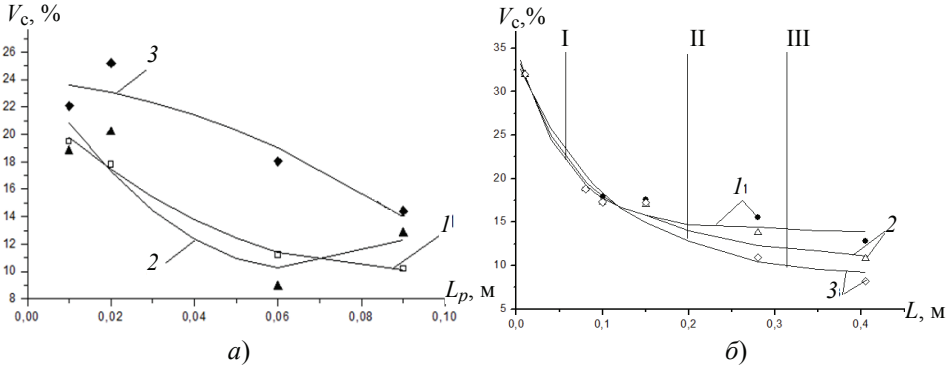


Рис. 3. Зависимости коэффициента неоднородности смеси (символы – эксперимент, линии – аппроксимация):

а – от расстояния L_p от среза лопасти до исследуемого сечения корпуса смесителя при различных значениях концентрации ключевого компонента:
1 – $c = 0{,}1$; $V_c = 22{,}38 – 278{,}6L_p + 1584{,}6\,(L_p)^2$; *2* – $c = 0{,}33$; $V_c = 25{,}03 – 455{,}6L_p + 3493{,}2\,(L_p)^2$; *3* – $c = 0{,}5$; $V_c = 23{,}95 – 25{,}9L_p – 935{,}1(L_p)^2$

б – от расстояния L от места загрузки при различных конструкциях лопастей 2 и 3 ступеней трехступенчатого смесителя (рапс – просо);
I, II, III – места установки лопастных ступеней; угол наклона лопастей к плоскости поперечного сечения корпуса $\alpha_1 = 60°$, $\alpha_2 = 30°$; ширина b и высота h лопастей:
1 – $b = 60$, $h = 60$ (все ступени); *2* – $b = 60$, $h = 60$ (1 и 2 ступени); $b = 60$, $h = 20$ (3 ступень); *3* – $b = 60$, $h = 60$ (1 ступень); $b = 60$, $h = 20$ (2 и 3 ступени)

В качестве такой функции представляется удачным выбор коэффициента неоднородности $V_{\text{с}}$

$$V_{\text{с}} = V_{\text{с}}\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right). \quad (2)$$

Задача оптимизации в этом случае будет состоять в определении параметров

$$\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right), \quad (3)$$

при которых функция (2) достигает минимума

$$V_{\text{с}} = V_{\text{с}}\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right) \rightarrow \min .$$

В качестве ограничений могут быть приняты условия, определяющие диапазоны допустимых размеров смесителя, например $L \le [L]$. Решение такой задачи с учетом взаимной зависимости параметров (3) является достаточно сложным. Однако в ряде случаев в уравнении (2) число параметров может быть уменьшено.

Выбор критерия оптимальности может меняться в соответствии с требованиями технического задания. В качестве целевой функции может быть принята масса аппарата или один из его габаритных размеров, например, длина корпуса смесителя $L = L\left(\alpha, R_{\text{л}}, L_p, ...\right)$, а в качестве ограничения – значение коэффициента неоднородности $V_{\text{с}}$ смеси $V_{\text{с}} \le [V_{\text{с}}]$.

Заключение

Результаты исследования барабанно-лопастного смесителя, полученные в виде кривых смешивания, устанавливают экстремальное влияние основных параметров его конструкции на коэффициент неоднородности получаемой сыпучей смеси. Поэтому для рационального выбора этих параметров при проектировании необходимо решение оптимальной задачи. При постановке этой задачи целевая функция, содержащая параметры проектируемого смесителя, должна быть сформирована либо в виде критерия однородности смеси, либо массы (или габаритных размеров) аппарата, в зависимости от условий технического задания.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с.

2. Патент № 2626203 Российская Федерация, МПК B01F 9/02 (2006.01), B01F 3/18 (2006.01). Смеситель : № 2016126747 : заявл. 04.07.2016 : опубл. 24.07.2017 / Таршис М. Ю., Черпицкий С. Н., Королев Л. В., Зайцев А. И. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 21. – 6 с.

3. Патент № 2812190 Российская Федерация, МПК B01F 27/2123 (2022.01). Смеситель сыпучих материалов : № 2023114105 : заявл. 29.05.2023 : опубл. 24.01.2024 / Таршис М. Ю., Смирнов П. М., Королев Л. В., Капранова А. Б. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 3. – 9 с.

4. Патент № 2848783 Российская Федерация, МПК B01F 29/62 (2022.01), B01F 31/55 (2022.01). Смеситель сыпучих материалов : № 2025118936 : заявл. 09.07.2025 : опубл. 21.10.2025 / Таршис М. Ю., Филинков Л. И., Королев Л. В., Капранова А. Б. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 30. – 8 с.

5. Патент № 2690539 Российская Федерация, МПКВ01F 3/18 (2006.01), G01N 21/00 (2006.01), G01N 1/38 (2006.01). Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету : № 2018124151 : заявл. 02.07.2019 : опубл. 04.06.2019 / Таршис М. Ю., Черпицкий С. Н., Королев Л. В., Капранова А. Б. ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «ЯГТУ». – Бюл. № 16. – 9 с.

6. Таршис, М. Ю. Исследование качества сыпучей смеси. Моделирование. Критерии. Эксперимент : монография / М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. И. Зайцев. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2015. – 116 с.

Investigation of a Drum-and-Blade Mixer for Bulk Materials and Selection of Its Parameters

© L. I. Filinkov[1], M. Yu. Tarshis[1], L. V. Korolev[2], A. B. Kapranova[1]

[1] *Department of Theoretical and Applied Mechanics; mutarshis@yahoo.com;*
[2] *Department of Information Systems and Technologies,*
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

Keywords: drum-and-blade mixer; non-uniformity coefficient; parameters; mixing process; calculation; bulk materials.

Abstract: A study on the influence of drum-and-blade mixer parameters on the quality of the resulting mixture was conducted. The effects of blade spacing along the apparatus axis, blade installation radius, and the angle of blade inclination relative to the mixer casing's cross-sectional plane on mixture homogeneity were investigated. The research results are presented as mixing curves. A formulation of the problem regarding the optimization of mixer parameters is also presented.

References

1. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)

2. Tarshis M.Yu., Cherpitskiy S.N., Korolev L.V., Zaytsev A.I. *Smesitel'* [Mixer], Russian Federation, 2017, Pat. 2626203 (In Russ.)

3. Tarshis M.Yu., Smirnov P.M., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Smesitel' sypuchikh materialov* [Bulk Material Mixer], Russian Federation, 2024, Pat. 2812190 (In Russ.)

4. Tarshis M.Yu., Filinkov L.I., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Smesitel' sypuchikh materialov* [Bulk Material Mixer], Russian Federation, 2025, Pat. 2848783 (In Russ.)

5. Tarshis M.Yu., Cherpitskiy S.N., Korolev L.V., Kapranova A.B. *Sposob issledovaniya kachestva smesi komponentov, razlichayushchikhsya po tsvetu* [Method for testing the quality of a mixture of components differing in color], Russian Federation, 2019, Pat. 2690539 (In Russ.)

6. Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zaytsev A.I. *Issledovaniye kachestva sypuchey smesi. Modelirovaniye. Kriterii. Eksperiment: monografiya* [Study of the quality of bulk mixture. Modeling. Criteria. Experiment: monograph], Yaroslavl': Izdatel'stvo YaGTU, 2015, 116 p. (In Russ.)

Untersuchung eines Trommel-Schaufel-Mischers für Schüttgüter und Auswahl seiner Parameter

Zusammenfassung: Diese Studie untersucht den Einfluss der Parameter eines Trommelmischers auf die Qualität des resultierenden Gemisches. Es ist der Einfluss der Schaufelteilung entlang der Mischerachse, ihres Radius und des Schaufelwinkels relativ zum Mischerkörperquerschnitt auf die Homogenität des Gemisches untersucht. Die Ergebnisse sind in Form von Mischkurven dargestellt. Es ist die Formulierung des Optimierungsproblems für die Mischerparameter vorgestellt.

Étude du mélangeur à ténèble et aérodes pointués pour les matières en granules et choix de ses paramètres

Résumé: Sont réalisées des études sur l'influence des paramètres d'un mélangeur à ténèbre et aérodés pointu sur la qualité du mélange obtenu. Est étudiée l'influence de la distance d'installation des aérodés le long de l'axe de l'appareil, de leur rayon d'installation et de l'angle d'inclinaison des aérodés par rapport au plan de section transversale du corps du mélangeur sur l'homogénéité du mélange. Les résultats des recherches sont présentés sous forme des courbes de mélange. Est présentée la formulation de la problématique d'optimisation des paramètres du mélangeur.

Авторы: ***Филинков Леонид Игоревич*** – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Таршис Михаил Юльевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Королев Леонид Владимирович*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и технологии»; ***Капранова Анна Борисовна*** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация.

УДК 66.081. 6-278
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.479-490

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ОПМН-К И АМН-П В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ХЛОРИДА И АЦЕТАТА КАЛЬЦИЯ

© В. А. Горшенина[1], О. А. Абоносимов[1], С. И. Лазарев[1] ✉, Г. С. Баронин[1], К. В. Брянкин[2], И. В. Зарапина[2], М. В. Соколов[3], П. Н. Бернацкий[4]

[1] *Кафедра «Механика и инженерная графика», mig@tstu.ru;*
[2] *кафедра «Химия и химические технологии»;*
[3] *кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;*
[4] *кафедра химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: полимерная мембрана; равновесный коэффициент распределения; электросорбционная активность.

Аннотация: Экспериментально исследованы кинетические коэффициенты электромембранного метода в процессе очистки технологических растворов производств пигментных материалов. Рассмотрены объекты исследования – технологические растворы, содержащие хлорид и ацетат кальция, и полупроницаемые мембраны ацетатцеллюлозного и полимерного видов с различными селективно-проницаемыми характеристиками. Исследовано влияние трансмембранных параметров проведения электромембранного процесса разделения на основные кинетические характеристики мембран ОПМН-К и АМН-П при очистке технологических растворов производств пигментных материалов. Дан анализ влияния трансмембранных параметров на кинетические зависимости коэффициента равновесного распределения мембран ацетатцеллюлозного и полиамидного вида. Получены аппроксимационные выражения для теоретического расчета коэффициента равновесного распределения в зависимости от физико-химической основы материала полупроницаемой мембраны, величины плотности тока, концентрации и температуры технологического раствора. Определены численные значения эмпирических коэффициентов, позволяющих рассчитывать и прогнозировать величины коэффициента равновесного распределения, которые могут быть использованы в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, используемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод.

Введение

Проблема очистки производственно-промышленных сточных вод в полной мере определяет экологическую обстановку водных ресурсов Российской Федерации. Химические производства, производящие красители и пигменты, к которым относится тамбовское предприятие ПАО «Пигмент», являются наиболее

опасными с точки зрения загрязнения окружающей среды. Анализ технологии производства пигментов показывает, что значительное количество сточных вод получается на стадии промывки суспензии. Промывные воды представляют собой водные растворы солей, таких как хлорид и ацетат, являющихся побочными продуктами стадии синтеза. Выбор эффективного метода очистки сточных вод связан с решением сложных задач, обусловленных многообразием растворенных вредных веществ и повышенными требованиями, предъявляемыми к очищенной воде [1 – 4].

В настоящее время существует большое количество методов очистки промышленных сточных вод, зависящих от типа вредных веществ: методы, основанные на использовании сил гравитации, электрофлотация и электрокоагуляция, флотация и коагуляция, фильтрация, отстаивание (седиментация), сорбция на активном угле, реагентный метод – перевод ионов в малорастворимые соединения, мембранные и электромембранные технологии обессоливания [2, 3] и др.

Электромембранное разделение – современный и эффективный метод очистки сточных вод, который показывает высокую степень очистки воды и обеспечивает комплексное разделение веществ [5 – 13]. Мембраны в этом методе играют важную роль в очистке сточных вод от загрязняющих компонентов. Они способны задерживать самые мелкие частицы, тем самым достигая максимального уровня очистки. Несмотря на это, большое количество таких компонентов, как пигменты, может затруднять процесс фильтрации растворов через мембрану. Это происходит из-за их взаимодействия с материалом мембраны, что в свою очередь ведет к снижению ее проницаемости. Работоспособность мембран по очистке сточных вод зависит от объема пропускаемой воды и компонентного состава растворов.

Для разработки схемы очистки необходимы экспериментальные данные по процессу массопереноса через мембрану. Литературные данные по результатам исследований ведущих специалистов в области процесса массопереноса через мембрану [14 – 16] подтверждают утверждение, что электросорбционная активность мембран значительно влияет на процесс электромембранного разделения. Поэтому для расчета массопереноса через мембрану необходимо получить экспериментальные данные по электросорбционной активности мембран, которая определяется их электросорбционной емкостью. Важным свойством мембраны является адсорбция, исследования которой и проводилось в данной работе. Главное внимание было уделено на распределение компонентов растворенных веществ по объему материала мембраны [12, 17].

Цель работы – анализ и расчет электросорбционной активности полимерных мембран ОПМН-К и АМН-П в водных растворах хлорида и ацетата кальция.

Методика и объекты экспериментальных исследований

Электросорбционная емкость мембраны – комплексный показатель, зависящий от множества факторов: природы материала, структуры, условий эксплуатации и характеристик раствора. Понимание этих зависимостей позволяет оптимизировать процессы электромембранного разделения и создавать мембраны с заданными свойствами для конкретных задач.

Различные полимеры (ацетат целлюлозы, полиамиды, полисульфоны и др.) обладают разной способностью к электросорбции из-за различий в составе, наличии функциональных групп и пористости. Так, мембраны на основе ацетата целлюлозы (АМН-П) при гидратации увеличивают число гидрофильных ОН-групп, что способствует росту электросорбционной емкости. Полиамидные мембраны (ОПМН-К) демонстрируют перестройку надмолекулярной структуры без разрушения амидных связей, что также влияет на их сорбционные свойства [12, 16].

Морфология поверхности, надмолекулярная структура, наличие пор, их размер и распределение определяют доступность активных центров для сорбции. Мембраны, полученные из растворов полимеров, характеризуются структурой взаимосвязанных, хаотически распределенных в пространстве пустот (межструктурных пространств) в некотором, характерном для данного типа мембран, диапазоне размеров и функционально представляют собой многослойное сито [18]. Пористость, эластичность, толщина мембраны определяют ее способность к набуханию, изменению структуры при гидратации и, как следствие, изменению электросорбционной емкости.

Заряд поверхности. Мембраны могут иметь положительный или отрицательный поверхностный заряд, что влияет на селективность и емкость по отношению к различным ионам.

С увеличением концентрации исходного раствора электросорбционная емкость, как правило, снижается. Это связано с заполнением пор сорбированными веществами, что уменьшает их сечение и ограничивает доступ новых ионов к активным центрам мембраны [12, 13]. Повышение плотности тока способствует увеличению электросорбционной емкости, так как электрическое поле выступает движущей силой для переноса ионов через мембрану. Рост температуры обычно приводит к снижению электросорбционной емкости. Это объясняется увеличением растворимости веществ в растворе и изменением физико-химических свойств мембраны (например, снижением адсорбции при повышении температуры). Вид ионов (размер, заряд, гидратация), а также состав раствора (наличие конкурирующих ионов, pH) существенно влияют на селективность и емкость мембраны.

Для исследования электросорбционной емкости мембран использовали лабораторную установку. Для поддержания необходимого градиента электрического потенциала (плотности тока) использовался источник постоянного электрического тока. Это позволило поддерживать постоянное значение плотности тока на мембране в течение всего опыта. Образцы мембран имели прямоугольную форму с размерами $(14\times4)\times10^{-2}$ м. Толщина каждого образца была предварительно измерена с помощью микрометра. После измерений образцы помещались в измерительную ячейку, заполненную заранее подготовленными водными растворами

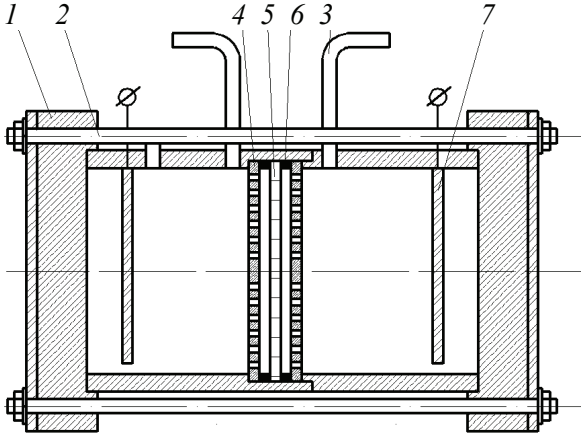


Рис. 1. Измерительная ячейка для исследования электросорбционной активности мембран:
1 – корпус; *2* – шпильки; *3* – трубки контроля уровня раствора в камерах; *4* – перфорированные пластины; *5* – мембрана; *6* – прокладки уплотнения; *7* – электроды

заданной концентрации (рис. 1). Чтобы определить диффузионное равновесие эксперимент выдерживался в течение 10…12 ч. По окончании периода экспозиции мембраны извлекались из ячейки, а их поверхность аккуратно очищалась от остатков раствора с помощью фильтровальной бумаги. Затем проводились повторные измерения геометрических параметров образцов: длины, ширины и толщины. Образцы вновь погружались в емкости, заполненные чистой дистиллированной водой, для последующей стадии экстракции адсорбированного вещества. Вода в резервуаре пополнялась ежедневно, а сточные воды перекачивались в емкости. Обычно для завершения промывки достаточно четырех замен жидкости. Путем измерения объемов использованной промывочной воды и оценки концентраций извлеченных веществ определялось количество адсорбированных компонентов в мембранах.

Таким образом, зная объем мембраны, объем использованной промывочной воды и определенные концентрации выделившихся веществ, можно рассчитать концентрации адсорбированных веществ непосредственно в образцах полимерных мембран.

Коэффициент равновесного распределения $k_р$ определяется по следующему выражению [12, 17]:

$$k_р = \frac{C_м}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где $C_м$ – концентрация растворенного вещества в полупроницаемой мембране, кг/м^3; $C_{исх}$ – концентрация вещества в исследуемом растворе, кг/м^3.

При проведении экспериментальных исследований электросорбционной емкости использовались отечественные нанофильтрационные мембраны АМН-П на основе полиамида эфиров целлюлозы и ОПМН-К на основе полиамида, промышленно выпускаемые ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир) (табл. 1). При выборе мембран учитывалось наиболее оптимальное соотношение удельной производительности и задерживающей способности, обеспечивающей требования к качеству пермеата.

Технические растворы, использованные в экспериментах, включали производные хлорида и ацетата кальция, концентрации которых подбирались таким образом, чтобы максимально соответствовать реальным условиям промышленных стоков ПАО «Пигмент». Предельно-допустимая концентрация раствора (**ПДК**), содержащего $CaCl_2$ (концентрация в промывных водах 0,9…2,0 кг/м^{3}с) – 2 мг/м^3; ПДК раствора, содержащего $Ca(CH_3COO)_2$ (концентрация 0,8…1,9) – 1,9 мг/м^3.

Таблица 1

Основные характеристики мембран

Параметры	Марка мембраны	
	ОПМН-К	АМН-П
Рабочее давление, МПа	1,6	1,6
Минимальная производительность по пермеату при температуре 25 °С, дм^3/м^{2}ч	100	60
Селективность, % по 0,2%-му раствору $MgSO_4$, не менее	95,0	98,0

Результаты и их обсуждение

Коэффициент равновесного распределения находится в определенной зависимости от материала мембран, природы растворенных веществ, их концентрации в исходном растворе, температуры и плотности тока [11, 19].

Полученные данные в ходе экспериментальных исследований по влиянию концентрации исходного раствора и плотности тока на величину коэффициента равновесного распределения водных растворов хлорида и ацетата кальция представлены на рис. 2, 3.

Изображения, представленные на рисунках, свидетельствуют о том, что с увеличением концентрации вещества в исходном растворе сорбционная емкость мембран уменьшается. Такая зависимость объясняется заполнением сорбированными веществами объема пор, сечение которых может значительно уменьшатся. Наиболее малые поры могут целиком заполняться адсорбированными молекулами, и, как следствие, быть «заблокированными» для переноса воды. Все это имеет существенное значение при объяснении зависимости кинетических характеристик от ряда параметров электромембранного разделения растворов.

Температура сильно влияет на процесс сорбции веществ из раствора. В литературе [12, 20] отмечено, что температура может, как способствовать, так и препятствовать сорбции. В данном случае наблюдалось снижение сорбционной способности полимерных мембран при увеличении температуры раствора, так как

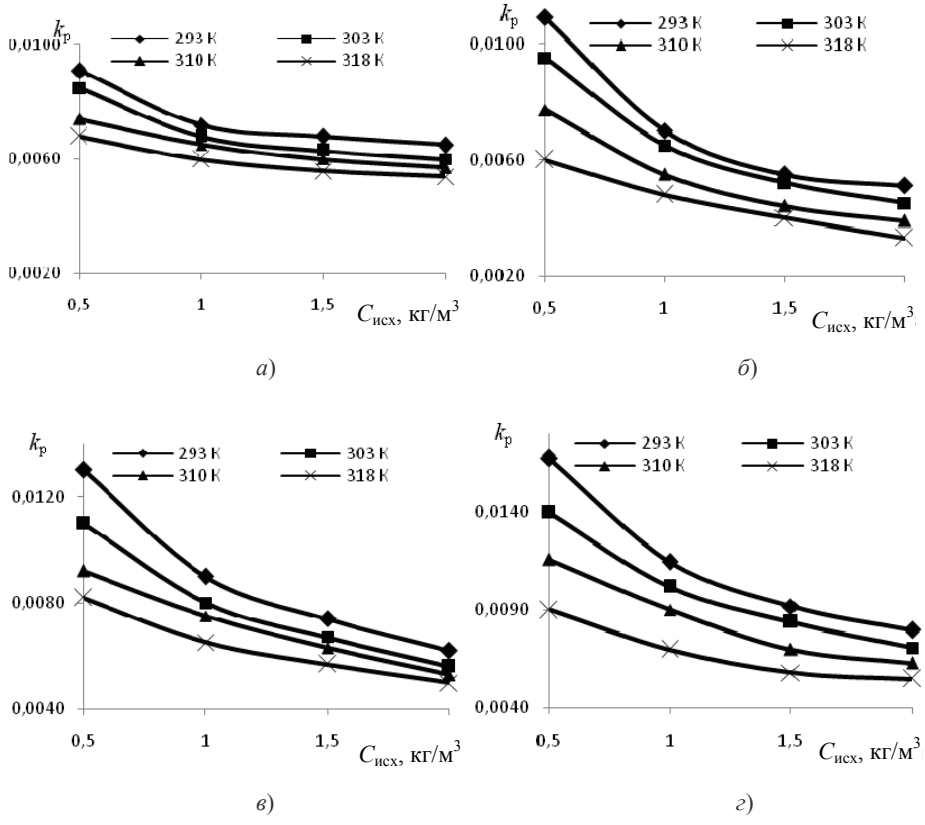


Рис. 2. Зависимости коэффициента равновесного распределения мембран АМН-П (*а*, *б*) и ОПМН-К (*в*, *г*) при i = 5,12 А/м^2 для растворов, содержащих вещество: *а*, *в* – $CaCl_2$; *б*, *г* – $Ca(CH_3COO)_2$

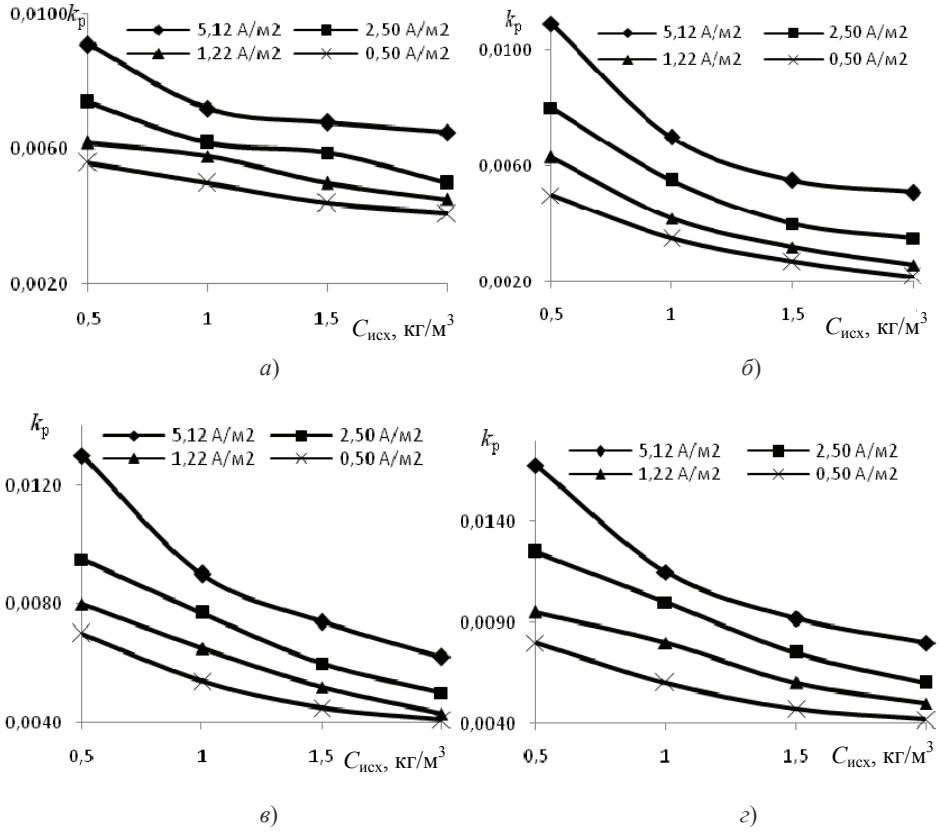


Рис. 3. Зависимости коэффициента равновесного распределения мембраны АМН-П (*а*, *б*) и ОПМН-К (*в*, *г*) при *T* = 293 K для растворов, содержащих вещество: *а*, *в* – $CaCl_2$; *б*, *г* – $Ca(CH_3COO)_2$

при повышении температуры растворимость вещества в растворе увеличивается. В соответствии с данными из [15, 16], атомы, образующие поверхность адсорбента, взаимодействуют как с молекулами растворенных веществ, так и с молекулами растворителя во время сорбции из растворов. При этом экспериментально установлено, что вещества с более высокой растворимостью в воде адсорбируются менее интенсивно [16].

Следует также отметить, что нарастание плотности тока способствует увеличению коэффициента равновесного распределения, так как электрическое поле играет роль движущей силы, которая способствует переносу ионов в растворе, и

Электросорбционная способность мембран ОПМН-К выше, чему АМН-П, что объясняется физико-химическими свойствами матрицы полупроницаемых мембран и знаком заряда активного слоя мембраны (полиамидные мембраны имеют положительный заряд, ацетилцеллюлозные – отрицательный). Существенное влияние оказывает характер и величина пор полимерных мембран [16, 17].

Для расчета равновесных коэффициентов распределения использовано аппроксимационное уравнение вида [21]

$$k_р = bC^{n-1}\left(\frac{T_0}{T}\right)^m, \qquad (2)$$

где C – концентрация раствора, кг/м^3; T_0, T – реперная (принятая нами 293 K) и рабочая температуры; b, n, m – эмпирические коэффициенты (табл. 2).

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов

Раствор	Процесс	Мембрана	*b*	*m*	*n*
Хлорид кальция	Сорбция	ОПМН-К	0,0322	0,613	–3,73
		АМН-П	0,0224	0,883	3,54
	Электросорбция	ОПМН-К	0,0322	0,581	–3,62
		АМН-П	0,0224	0,862	3,42
Ацетат кальция	Сорбция	ОПМН-К	0,0326	0,586	2,63
		АМН-П	0,0322	0,563	4,54
	Электросорбция	ОПМН-К	0,0289	0,556	2,43
		АМН-П	0,0298	0,562	4,32

Расхождение экспериментальных и рассчитанных по формуле (2) значений не превышают 15 %, что является достаточным для инженерных расчетов.

Заключение

Для очистки технологических растворов производств пигментных материалов выбран метод электромембранного разделения как наиболее экономически и экологически эффективный. Результатом проведенных экспериментальных исследований является получение оригинальных данных по коэффициентам равновесного распределения мембран ОПМН-К и АМН-П по растворам хлорида и ацетата кальция в зависимости от изменения основных параметров проведения процесса разделения. Проанализированы зависимости коэффициента равновесного распределения мембран от концентрации растворенных веществ для всех исследуемых мембран и выявлены факторы влияния. Объяснено влияние концентрации, температуры раствора и плотности тока на изменение коэффициента равновесного распределения.

В результате анализа полученных зависимостей и литературных данных других исследователей предложены выражения для математического описания коэффициента равновесного распределения мембран со значениями эмпирических коэффициентов для исследуемых растворов и мембран. Полученные результаты исследований следует использовать в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, используемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ 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. Колесников, В. А. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / В. А. Колесников, С. О. Вараксин, Д. В. Павлов // Чистая вода: проблемы и решения. – 2010. – № 2-3. – С. 50–59.

2. Шаршунов, В. А. Очистка сточных вод и утилизация их отходов / В. А. Шаршунов. – Минск : Мисанта, 2020. – 642 с.

3. Алекина, Е. В. Анализ методов очистки сточных вод, используемых на машиностроительных предприятиях / Е. В. Алекина, И. А. Сумарченкова // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 1(97). – С. 56–61.

4. Исследование процесса очистки сточных вод на ПАО «Пигмент» / Т. А. Сухорукова, В. Я. Борщев, Л. Г. Михайлова, Е. Г. Михайлова, Н. Н. Осипов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 129–134. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.129-134

5. Paidar, M. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Perspective / M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 209. – P. 737–756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209

6. Свитцов, А. А. Введение в мембранные технологии / А. А. Свитцов. – Москва : ДеЛи принт, 2007. – 207 с.

7. Джубари, М. К. Очистка сточных вод заводов по производству пигментов в два этапа: приготовление активированного угля и процесс электродиализа / М. К. Джубари, Б. С. Таха // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 155–159. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.020.

8. Rouquerol, J. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications / J. Rouquerol, F. Rouquerol, K. Sing. – Elsevier, 1998. – 467 p.

9. Алексеева, Н. В. Ультрафильтрационное разделение промывных вод производства пигментов алого, желтого и оранжевого / Н. В. Алексеева, В. Ю. Литницкий, А. Я. Куликов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 282–288. doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.282-288

10. Some Kinetic Dependence of Electrohyper Filtration Method of Purification of Waste Water from Iron Ions / A. A. Levin, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev, O. A. Kovaleva, I. V. Khorokhorina, M. A. Kuznetsov // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 295–306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306

11. Мембраны и мембранные технологии : монография / А. Б. Ярославцев [и др.] ; отв. ред. А. Б. Ярославцев. – Москва : Научный мир, 2013. – 616 с.

12. Исследования кинетических и сорбционных характеристик мембран ОФАМ-К и ОПМН-К в процессе электронанофильтрационного разделения водного раствора сульфата калия / Д. Н. Коновалов, С. И. Лазарев, Пепе Луа, К. К. Полянский // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2023. – Т. 85, № 1. – С. 24–32. doi: org/10.20914/2310-1202-1-24-32

13. Котенев, С. И. Кинетические характеристики электромикрофильтрационной очистки технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ / С. И. Котенев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 317–327. doi: 10.17277/vestnik.2024.02.pp.317-327

14. Karge, H. G. Adsorption and Diffusion / H. G. Karge, J. Weitkamp // Molecular Sieves – Science and Technology. – 2008. – Vol. 7. – 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1

15. Ягодовский, В. Д. Адсорбция : учебное пособие для студентов / В. Д. Ягодовский. – Москва : Бином ; Лаб. знаний, 2015. – 216 с.

16. Ямпольский, Ю. П. Методы изучения свободного объема в полимерах / Ю. П. Ямпольский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 1. – С. 66–87.

17. Сорбционные характеристики обратноосмотических мембран / В. Л. Головашин, С. В. Ковалев, К. С. Лазарев, П. А. Чепеняк //Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10, № 2. – С. 201–207.

18. Неугодова, Н. П. Современные направления в мембранной нанофильтрации биофармпрепаратов. Часть 3. Способы обеспечения безопасности фильтроэлементов / Н. П. Неугодова, Г. В. Долгова, Г. А. Сапожникова [и др.] // Мембраны. – 2008. – № 2(38). – С. 14–17.

19. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на очистных предприятиях / О. А. Абоносимов, М. А. Кузнецов, О. А. Ковалева, В. М. Поликарпов, В. М. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641–655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655

20. Равновесный коэффициент распределения и потенциал поля поверхностных сил ультрафильтационных мембран в растворах биохимических производств/ С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, А. А. Лавренченко, А. А. Арзамасцев, Д. А. Родионов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 87–95. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.087-095

Experimental Investigation and Calculation of the Electro-Sorption Activity of OPMN-K and AMN-P Polymer Membranes in Aqueous Solutions of Calcium Chloride and Calcium Acetate

© V. A. Gorshenina[1], O. A. Abonosimov[1], S. I. Lazarev[1] ✉, G. S. Baronin[1], K. V. Bryankin[2], I. V. Zarapina[2], M. V. Sokolov[3], P. N. Bernatsky[4]

[1] *Department of Mechanics and Engineering Graphics, mig@tstu.ru;*
[2] *Department of Chemistry and Chemical Technologies;*
[3] *Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[4] *Department of Chemistry, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation*

Keywords: polymer membrane; equilibrium distribution coefficient; electrosorption activity.

Abstract: The kinetic coefficients of the electromembrane method were experimentally investigated during the purification of process solutions from pigment material production. The study focused on process solutions containing calcium chloride and calcium acetate, as well as semipermeable membranes – specifically cellulose acetate and polymer types-with varying selective permeability characteristics. The influence of transmembrane parameters of the electromembrane separation process on the key kinetic characteristics of OPMN-K and AMN-P membranes was examined in the context of purifying process solutions from pigment material production. An analysis is presented regarding the influence of transmembrane parameters on the kinetic dependencies of the equilibrium distribution coefficient for cellulose acetate and polyamide membranes. Approximation formulae have been derived for the theoretical calculation of the equilibrium distribution coefficient based on the physicochemical properties of the semipermeable membrane material, current density, and the concentration and temperature of the process solution. Numerical values for empirical coefficients have been determined to enable the calculation and prediction of the equilibrium distribution coefficient; these values can be utilized in the design of laboratory, pilot, and industrial-scale units for the separation, purification, and concentration of process streams and wastewater.

References

1. Kolesnikov V.A., Varaksin S.O., Pavlov D.V. [Wastewater treatment in various industries using best available technologies], *Chistaya voda: problemy i resheniya* [Clean Water: Problems and Solutions], 2010, no. 2-3, pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Sharshunov V.A. *Ochistka stochnykh vod i utilizatsiya ikh otkhodov* [Wastewater treatment and waste utilization], Minsk: Misanta, 2020, 642 p. (In Russ.)

3. Alekina Ye.V., Sumarchenkova I.A. [Analysis of wastewater treatment methods used at machine-building enterprises], *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye* [Water Purification. Water Treatment. Water Supply], 2016, no. 1(97), pp. 56-61. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Sukhorukova T.A., Borshchev V.YA., Mikhaylova L.G., Mikhaylova Ye.G., Osipov N.N. [Study of the wastewater treatment process at PJSC Pigment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 129-134. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.129-134 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Perspective, *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 209, pp. 737-756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209

6. Svittsov A.A. *Vvedeniye v membrannyye tekhnologii* [Introduction to Membrane Technologies], Moscow: DeLi print, 2007, 207 p. (In Russ.)

7. Gubari M.Q., Taha B.S. Wastewater Treatment of Pigment Production Plants in Two Stages: Prepared Activated Carbon and Electrodialysis Process, *Polzunovskiy Vestnik*, 2023, no. 2, pp. 155-159. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.020

8. Rouquerol J., Rouquerol F., Sing K. *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*, Elsevier, 1998, 467 p.

9. Alekseyeva N.V., Litnitskiy V.Yu., Kulikov A.Ya. [Ultrafiltration separation of wash waters from scarlet, yellow, and orange pigment production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 282-288. doi: 10.17277/vestnik.2019.02. pp.282-288 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Levin A.A., Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Khorokhorina I.V., Kuznetsov M.A. Some Kinetic Dependence of Electrohyper Filtration Method of Purification of Waste Water from Iron Ions, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 295-306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02. pp.295-306

11. Yaroslavtsev A.B. (Ed.) [et al.], *Membrany i membrannyye tekhnologii: monografiya* [Membranes and Membrane Technologies: Monograph], Moscow: Nauchnyy mir, 2013, 616 p. (In Russ.)

12. Konovalov D.N., Lazarev S.I., Lua Pepe, Polyanskiy K.K. [Investigation of Kinetic and Sorption Characteristics of OFAM-K and OPMN-K Membranes during the Electro-nanofiltration Separation of an Aqueous Potassium Sulfate Solution], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2023, vol. 85, no. 1, pp. 24-32. doi: org/10.20914/2310-1202-1-24-32 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Kotenev S.I. [Kinetic Characteristics of the Electromicrofiltration Purification of Process Solutions from Synthetic Surfactants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 317-327. doi: 10.17277/vestnik. 2024.02.pp.317-327 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Karge H.G., Weitkamp J. *Adsorption and Diffusion*, Molecular Sieves – Science and Technology, 2008, vol. 7, 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1

15. Yagodovskiy V.D. *Adsorbtsiya: uchebnoye posobiye dlya studentov* [Adsorption: A Textbook for Students], Moscow: Binom; Lab. znaniy, 2015, 216 p. (In Russ.)

16. Yampol'skiy Yu.P. [Methods for Studying Free Volume in Polymers], *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2007, vol. 76, no. 1, pp. 66-87. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Golovashin V.L., Kovalev S.V., Lazarev K.S., Chepenyak P.A. [Sorption Characteristics of Reverse Osmosis Membranes], *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and Chromatographic Processes], 2010, vol. 10, no. 2, pp. 201-207. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Neugodova N.P., Dolgova G.V., Sapozhnikova G.A. [et al.], [Modern Trends in Membrane Nanofiltration of Biopharmaceutical Products. Part 3. Methods for Ensuring the Safety of Filter Elements], *Membrany* [Membranes], 2008, no. 2(38), pp. 14-17. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependencies and process efficiency of electrochemical membrane wastewater separation at treatment facilities], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Lavrenchenko A.A., Arzamastsev A.A., Rodionov D.A. [Equilibrium distribution coefficient and surface force field potential of ultrafiltration membranes in biochemical production solutions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 87-95. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.087-095 (In Russ., abstract in Eng.)

Experimentelle Untersuchungen und Berechnung der Elektrosorptionsaktivität der Polymermembranen OPMN-K und AMN-P in wässrigen Lösungen von Calciumchlorid und -acetat

Zusammenfassung: Die kinetischen Koeffizienten der Elektromembrantrennung bei der Reinigung von Prozesslösungen für die Pigmentherstellung sind experimentell untersucht. Untersuchungsobjekte sind Prozesslösungen mit Calciumchlorid und Acetat sowie semipermeable Membranen aus Celluloseacetat und Polymeren mit unterschiedlichen selektiven Permeabilitätseigenschaften. Der Einfluss der Transmembranparameter des Elektromembrantrennprozesses auf die wichtigsten kinetischen Eigenschaften der Membranen OPMN-K und AMN-P während der Reinigung der Prozesslösungen ist analysiert. Es ist die Analyse des Einflusses der Transmembranparameter auf die kinetischen Abhängigkeiten des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten von Celluloseacetat- und Polyamidmembranen vorgestellt. Näherungsformeln für die theoretische Berechnung des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten in Abhängigkeit von den physikochemischen Eigenschaften des semipermeablen Membranmaterials, der Stromdichte sowie der Konzentration und Temperatur der Prozesslösung sind hergeleitet. Es sind numerische Werte für empirische Koeffizienten ermittelt, die es ermöglichen, die Werte des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten zu berechnen und vorherzusagen. Diese können bei der Auslegung von Labor-, Pilot- und Industrieanlagen verwendet werden, die in industriellen Prozessen zur Trennung, Reinigung und Konzentration von Industrie- und Abwasser eingesetzt werden.

Études expérimentales et calcul de l'activité électro-sorbiente des membranes polymériques OPMN-K et AMN-P dans des solutions aqueuses de chlorure et acétate de calcium

Résumé: Sont étudiés expérimentalement les coefficients cinétiques de la méthode électromémbrane dans le processus de la purification des solutions technologiques des industries pigmentaires. Les objets de recherche examinés sont des solutions technologiques contenant du chlorure et de l'acétate de calcium, ainsi que des membranes semi-perméables à la base de cellulose acétate et de polymères présentant de différentes caractéristiques de perméabilité sélective. Est étudiée l'influence des paramètres transmembranaux du processus de la séparation électromémbrane sur les principales caractéristiques cinétiques des membranes OPMN-K et AMN-P lors de la purification des solutions technologiques de la production des matières pigmentaires. Est présentée une analyse de l'influence des paramètres transmembranaux sur les dépendances cinématiques du coefficient de la distribution à l'équilibre des membranes à la base de cellulose acétate et de polyamide. Sont obtenues des expressions d'approximation pour le calcul théorique du coefficient de la distribution d'équilibre en fonction de la base physico-chimique du matériau de la membrane semi-perméable, de la densité de courant, de la concentration et de la température de la solution technologique. Sont établies des valeurs numériques des coefficients empiriques pour calculer et prévoir les valeurs du coefficient de la répartition à l'équilibre qui peuvent être utilisées dans la conception des installations de laboratoire, pilotes et industrielles utilisées dans les procédés de production de séparation, de traitement et de concentration des eaux usées et des procédés industriels.

Авторы: ***Горшенина Виктория Александровна*** – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Абоносимов Олег Аркадьевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Лазарев Сергей Иванович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; ***Баронин Геннадий Сергеевич*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Брянкин Константин Вячеславович*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; ***Зарапина Ирина Вячеславовна*** – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; ***Соколов Михаил Владимирович*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация, ***Бернацкий Павел Николаевич*** – доктор химических наук, доцент, доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 66.081
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.491-504

АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ИОНООБМЕННОЙ СМОЛЕ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОДЕИОНИЗАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ

© И. В. Хорохорина[1], О. С. Филимонова[2] ✉, С. И. Лазарев[2], Т. П. Дьячкова[3], К. В. Брянкин[4], Г. С. Баронин[2], П. Н. Бернацкий[5]

[1] *Кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»*;
[2] *кафедра «Механика и инженерная графика»*, *nauka2613@mail.ru*;
[3] *кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»*,
[4] *кафедра «Химия и химические технологии»*,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;
[5] *кафедра химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»*, *Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: дифференциальная сканирующая калориметрия; инфракрасная спектроскопия; ионообменная смола; процесс электродеионизации; рентгенофазовый анализ; термогравиметрия; хромсодержащий технологический раствор.

Аннотация: Представлены результаты комплексного исследования структурных изменений смешанной ионообменной смолы на основе сополимера стирола с дивинилбензолом после электродеионизационной очистки технологического раствора, содержащего ионы хрома (VI). С помощью методов инфракрасной спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, термогравиметрии и рентгенофазового анализа изучены исходный, водонасыщенный и рабочий образцы смолы. Установлено, что электродеионизация не приводит к деструкции полимерной матрицы: смола сохраняет аморфную структуру и химическую природу функциональных групп. Однако выявлены локальные структурные перестройки: смещение аморфного максимума на рентгеновских дифрактограммах в область больших углов 2θ, сужение его ширины, изменение формы полос ИК-спектров, соответствующих сульфо- и аммониевым группам, а также усложнение термодеструкции с появлением многостадийных экзотермических эффектов. Полученные изменения обусловлены взаимодействием функциональных групп с ионами хрома, перераспределением противоионов и изменением гидратации смолы. Результаты свидетельствуют о сохранении целостности материала и обосновывают возможность многократного использования смолы в процессах электродеионизационной очистки хромсодержащих растворов.

Введение

Очистка промышленных сточных вод, содержащих соединения хрома, является одной из актуальных задач современной экологической и химической технологии. Ионы хрома, поступающие в сточные воды предприятий гальванического производства, характеризуются высокой токсичностью, способностью к биоаккумуляции и негативным воздействием на водные экосистемы и здоровье человека [1 – 3]. В связи с ужесточением экологических требований возрастает необходи-

мость разработки эффективных технологий глубокой очистки хромсодержащих растворов и повторного использования очищенной воды [4].

Одним из наиболее перспективных методов удаления ионов металлов из технологических растворов является электродеионизация, сочетающая преимущества ионного обмена и электромембранных процессов. Использование электрического поля обеспечивает непрерывную регенерацию ионообменных материалов непосредственно в процессе очистки, что позволяет повысить эффективность извлечения загрязняющих компонентов и снизить эксплуатационные затраты [5 – 7].

Ключевым элементом процесса электродеионизации является смешанная ионообменная смола, обеспечивающая перенос ионов, повышение электропроводности межмембранного пространства и интенсификацию процессов массопереноса. При длительной эксплуатации смола подвергается воздействию электрического поля, изменяющегося химического состава раствора и адсорбированных ионов металлов, что может приводить к изменению ее химического состава, структуры, функциональных групп и термических свойств [8 – 10].

Несмотря на широкое применение смешанных ионообменных смол в процессах электродеионизации, вопросы, связанные с изменением их физико-химических свойств после эксплуатации при очистке хромсодержащих технологических растворов, изучены недостаточно. В ходе очистки происходит не только сорбция ионов хрома смешанной ионообменной смолой, но и изменение ее химической структуры, функциональных групп и термической устойчивости. Комплексное исследование структуры и состава смолы с использованием современных физико-химических методов позволяет получить новые сведения о механизмах взаимодействия ионов хрома с ионообменной матрицей и оценить влияние процесса электродеионизации на свойства материала [11].

Цель работы – комплексное исследование изменений химического состава, структуры и термических свойств смешанной ионообменной смолы после процесса электродеионизации технологического раствора, содержащего ионы хрома (VI), с использованием методов инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопия), дифференциальной сканирующей калориметрии (**ДСК**), термогравиметрии (**ТГ**) и рентгенофазового анализа (**РФА**).

Материалы и методы

Для проведения комплексного исследования использовали исходный, водонасыщенный и рабочий образцы смешанной ионообменной смолы на основе сополимера стирола с дивинилбензолом, содержащей функциональные группы $–RSO_3H$ для катионообменной фазы и группы $–R_4N^+OH$ – для анионообменной. Соотношение $H^+/OH^–$ в смеси – 49 – 51 % / 51 – 49 %.

Подготовка рабочего образца проводилась на электродеионизационной лабораторной установке по методике [12, 13] с использованием ионообменных мембран МК-40 и МА-41П.

Для получения водонасыщенных образцов смолы помещали в дистиллированную воду по методике [14, 15].

Для проведения исследований методами ДСК и ТГ в тиглях из оксида алюминия Al_2O_3 осуществляли нагрев образцов в диапазоне 40…900 °С со скоростью нагрева 10 К/мин в воздушной среде с помощью термоанализатора NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-0094-M.

Для получения дифрактограмм методом рентгенофазового анализа использовали рентгеновский дифрактометр ARL Equinox 1000.

Для получения инфракрасных спектров применялся ИК-Фурье-спектрометр марки Jasco FT/IR 6700 в волновом диапазоне 500…4000 $см^{–1}$ с разрешением 4 $см^{–1}$.

Результаты

Анализ результатов ДСК-ТГ

Исходный образец характеризуется постепенной потерей массы практически во всем температурном диапазоне. Наиболее интенсивные процессы наблюдаются в нескольких температурных интервалах (рис. 1, *а*).

Смола после процесса электродеионизации представляет наибольший научный интерес. Его термограмма отличается сразу несколькими особенностями (рис. 1, *б*). Более раннее начало интенсивной деструкции.

Основной процесс разложения начинается несколько раньше, чем у исходной смолы. Это может свидетельствовать о том, что эксплуатация приводит к частичному изменению структуры полимерной матрицы. Причинами могут быть воздействие электрического поля, многократная миграция ионов, накопление ионов хрома, локальное изменение кислотности внутри зерен смолы.

При рассмотрении изменения формы ДСК-пика можно отметить, что в отличие от исходной смолы появляется выраженное разделение основного теплового эффекта. На кривой наблюдаются несколько последовательных максимумов в диапазоне примерно 510…590 °С. Это свидетельствует о том, что процесс термического разрушения становится многостадийным, вероятно вследствие того, что часть функциональных групп взаимодействует с соединениями хрома, появляются участки полимера с различной термической устойчивостью и изменяется распределение энергии связей внутри структуры смолы. Также отметим, что после завершения разложения остаточная масса немного выше, чем у исходного образца, что связано с накоплением соединений хрома, неорганических солей и продуктов взаимодействия функциональных групп с ионами металлов.

Проанализировав данные водонасыщенного образца смешанной ионообменной смолы, сделан вывод, что он занимает промежуточное положение (рис. 1, *в*). Его поведение отличается как от исходной смолы, так и от смолы после эксплуатации. Основной экзотермический эффект наблюдается примерно в тех же температурных пределах, однако его форма отличается. Пик становится более широким. Это свидетельствует о более равномерном протекании процессов разрушения. Можно предположить, что предварительное насыщение водой приводит к перераспределению внутренних напряжений полимерной сетки.

При сравнении трех образцов между собой можно наблюдать, что в исходной смоле наиболее однородная структура, относительно стабильная полимерная матрица и выделяется один выраженный основной этап разрушения. В образце смолы после проведения эксперимента наиболее сложная форма ДСК-кривой, происходит многостадийная деструкция, отмечаются признаки изменения структуры вследствие накопления ионов хрома и увеличения доли неорганического остатка.

В водонасыщенном образце происходит более плавное разрушение и прослеживается влияние связанной воды на кинетику термодеструкции. Результаты показывают не просто различия в термостойкости, а изменение механизма термического разложения смолы после эксплуатации.

Проведенный термический анализ показал, что процесс электродеионизации приводит к изменению характера термической деструкции смешанной ионообменной смолы. Если для исходного материала характерен преимущественно одностадийный процесс разрушения полимерной матрицы, то после эксплуатации наблюдается разделение основного теплового эффекта на несколько последовательных стадий, что свидетельствует о формировании участков с различной термической устойчивостью. Вероятной причиной является взаимодействие функциональных групп смолы с ионами хрома и изменение химического окружения активных центров, что приводит к перераспределению энергии химических связей в полимерной структуре.

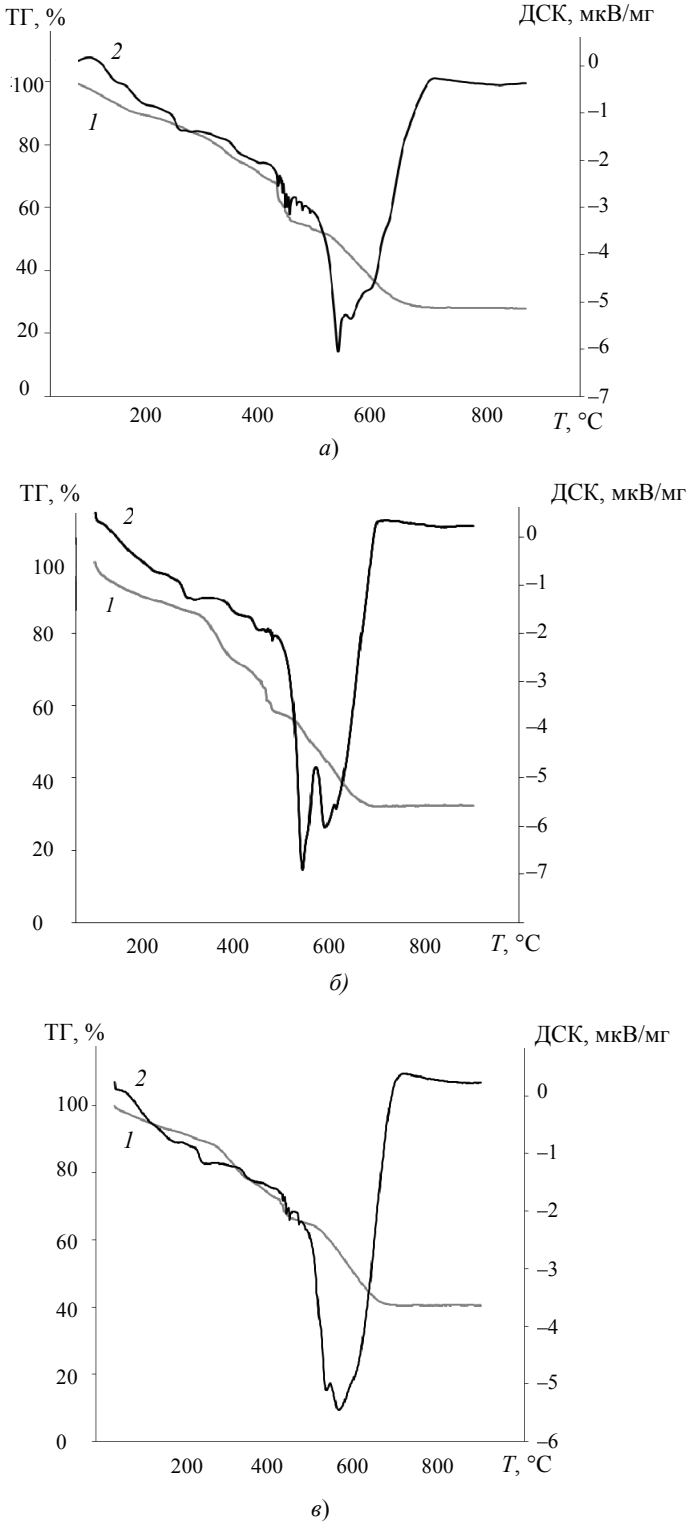


Рис. 1. ДСК-ТГ исходного (*а*), рабочего (*б*) и водонасыщенного (*в*) образцов:
1 – ТГ; *2* – ДСК

Рентгенофазовый анализ

Для исходной смолы на дифрактограмме отсутствуют узкие интенсивные пики, характерные для кристаллических веществ (рис. 2, график *1*). Наблюдается широкий максимум в области примерно $2\theta = 16…32°$ с максимумом около 26…27°. Это типичная картина для аморфного сополимера стирола с дивинилбензолом без кристаллических включений для пространственно-сшитой полимерной сетки, что полностью соответствует литературным данным для сильнокислотных и сильноосновных ионообменных смол.

Анализируя дифрактограммы для водонасыщенной смолы (см. рис. 2, график *2*), интересно, что максимум становится немного шире. Это означает, что предварительное насыщение водой вызывает не образование новых фаз, а изменение расстояний между макромолекулярными цепями. Иными словами, остаточная связанная вода влияет на степень упаковки полимерной сетки.

При рассмотрении смолы после электродеионизации, отметим, что общая форма дифрактограммы сохраняется (см. рис. 2, график *3*). Следовательно, можно утверждать, что полимерная матрица не разрушилась. Однако заметны некоторые отличия. Широкий максимум становится менее симметричным. Кроме того, в области 40…45° наблюдается более выраженное локальное повышение интенсивности. Это может свидетельствовать о появлении небольшого количества новых упорядоченных участков либо частиц неорганических соединений. Отсутствие выраженных острых пиков говорит о том, что соединения хрома находятся либо в аморфном состоянии, либо в очень малых количествах, либо равномерно распределены внутри смолы. Это хорошо согласуется с результатами ДСК.

В итоге можно говорить о том, что исходная смола имеет типичную аморфную структуру стирол-дивинилбензольной матрицы. Водонасыщенная смола демонстрирует промежуточный характер дифрактограммы, что указывает на влияние процессов гидратации на упаковку полимерной сетки. После электродеионизации общая аморфность сохраняется, однако изменяется распределение интенсивности широких максимумов, что свидетельствует о локальной перестройке структуры полимера вследствие взаимодействия функциональных групп с ионами хрома.

Наиболее важным результатом является смещение главного диффузного максимума, что видно из табл. 1.

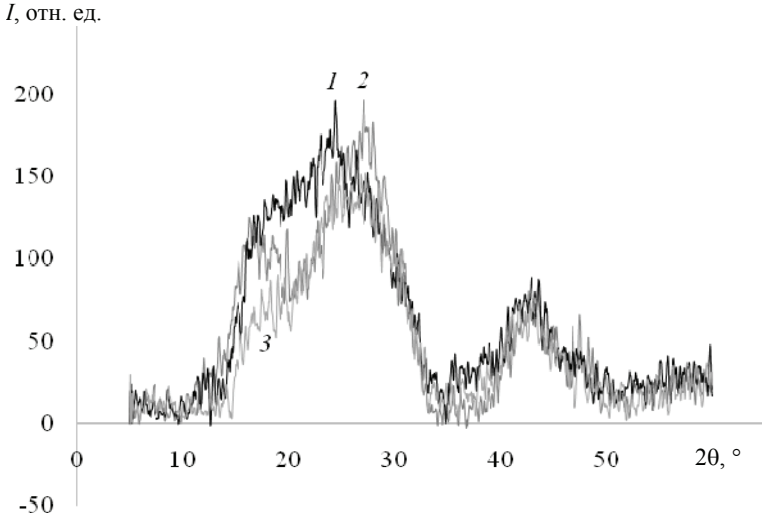


Рис. 2. Рентгенофазовый анализ:
1, *2*, *3* – соответственно исходный, водонасыщенный, рабочий образцы

Смещение широкого максимума в область больших углов свидетельствует об уменьшении среднего межцепного расстояния в полимерной матрице. Это означает, что после эксплуатации структура смолы становится более компактной.

Также отметим, что максимальная интенсивность уменьшается с 196,7 до 152,7. Снижение почти на 22 % говорит о том, что после электродеионизации уменьшается однородность аморфной структуры. Данные результаты согласуются с результатами ДСК, где также наблюдалось изменение характера термической деструкции.

После насыщения водой максимум остается около 27°, то есть структура полностью не возвращается к исходному состоянию. При этом интенсивность вновь становится высокой. Можно утверждать, что процесс гидратации вызывает обратимое перераспределение полимерных цепей, однако полностью восстановить первоначальную упаковку невозможно.

С точки зрения структуры для сополимера стирола с дивинилбензолом широкий максимум обусловлен аморфной упаковкой макромолекул. После эксплуатации ионообменной смешанной смолы кристаллические пики не появляются, полимер остается аморфным, изменяется положение аморфного гало и происходит перестройка локальной структуры. Таким образом, процесс электродеионизации приводит не к кристаллизации материала, а к изменению степени упорядоченности аморфной полимерной сетки.

Рассмотрим ширину аморфного максимума для исходного образца ионообменной смешанной смолы (табл. 1), которая составляет 14,15°, что является наибольшим значением среди исследованных образцов. Широкое аморфное гало свидетельствует о высокой степени структурной разупорядоченности полимерной матрицы, что характерно для свежих ионообменных смол на основе сополимера стирола и дивинилбензола. Макромолекулярные цепи имеют широкий диапазон межцепных расстояний и разнообразное локальное окружение функциональных групп. Для смолы после эксплуатации ширина аморфного максимума уменьшается до 10,79°, то есть примерно на 24 % по сравнению с исходным образцом. Можно предположить, что распределение межцепных расстояний становится более узким, а локальная структура полимерной матрицы – более однородной. Одновременно максимум смещается в область больших углов 2θ, что указывает на уменьшение среднего расстояния между структурными фрагментами полимера.

При этом отсутствие узких дифракционных максимумов показывает, что смола сохраняет аморфный характер и не подвергается кристаллизации. Для водонасыщенной смолы получено минимальное значение ширины аморфного гало – 8,72°. По сравнению с исходной смолой ширина уменьшается почти на 38 %, а по сравнению со смолой после эксплуатации – еще примерно на 19 %. Это свидетельствует о дальнейшем сужении распределения межцепных расстояний и более упорядоченной упаковке аморфной полимерной матрицы. Предварительное набухание смолы в воде способствует перераспределению макромолекулярных цепей.

Таблица 1

Положение главного аморфного максимума

Образец	Максимальная интенсивность, отн. ед.	Положение максимума 2θ, °	Ширина аморфного максимума на полувысоте 2θ, °
Исходный	196,67	24,44	14,15
Водонасыщенный	196,73	27,05	8,72
Рабочий	152,69	27,26	10,19

Количественный анализ дифрактограмм показал, что процесс электродеионизации и последующая гидратация оказывают существенное влияние на структуру смешанной ионообменной смолы. Для всех образцов сохраняется аморфный характер строения, однако наблюдается последовательное уменьшение ширины аморфного максимума.

Одновременно максимум аморфного гало смещается с 24,2° до 27,1°, что указывает на уменьшение среднего межцепного расстояния и уплотнение полимерной структуры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что электродеионизация не вызывает образования новых кристаллических фаз, однако приводит к локальной структурной перестройке полимерной матрицы и изменению степени ее аморфной упорядоченности.

Полученные экспериментальные данные ДСК и РФА показывают закономерную связь. Рентгенофазовый анализ позволяет определить фазовый состав кристаллической матрицы. Дифференциальная сканирующая калориметрия показывает изменение механизма термического разрушения. Следовательно, изменение термической устойчивости обусловлено именно перестройкой структуры смолы.

ИК-спектроскопия

Все три спектра имеют одинаковый набор основных полос поглощения, характерных для смешанной ионообменной смолы на основе сополимера стирола и дивинилбензола (рис. 3). Это свидетельствует о том, что после процесса электродеионизации химическая природа полимерной матрицы сохраняется и полного разрушения функциональных групп не происходит. Вместе с тем наблюдаются изменения интенсивности и формы отдельных полос, отражающие изменение локального химического окружения функциональных групп, перераспределение связанной воды и структурную перестройку полимерной сетки. Во всех спектрах присутствует широкая полоса в области 3200…3500 см$^{-1}$, соответствующая валентным колебаниям гидроксильных групп и молекул связанной воды. Стоит отметить, что у водонасыщенной смолы полоса наиболее интенсивная и широкая, у исходной смолы интенсивность меньше, а после эксплуатации форма полосы изменяется, однако широкое поглощение сохраняется, что говорит о различной степени гидратации функциональных групп.

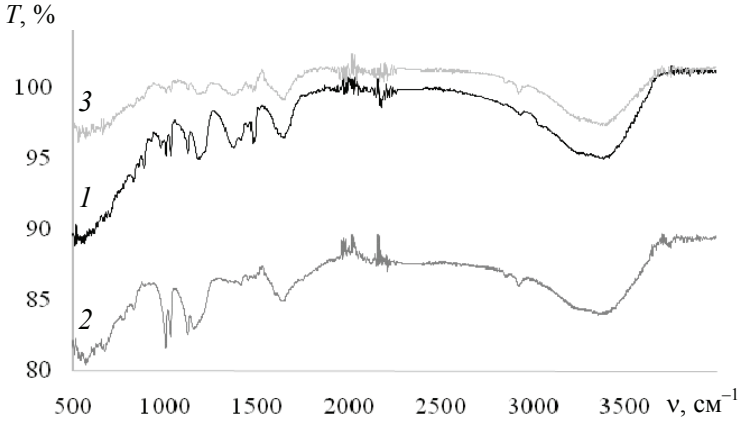


Рис. 3. ИК-спектры:
1 – исходный образец; *2* – водонасыщенный образец; *3* – рабочий образец

Также в спектрах наблюдаются слабые полосы валентных колебаний С–Н (область 3000…2800 $см^{-1}$). После эксплуатации заметных изменений практически нет, что свидетельствует о сохранении углеводородной основы полимера.

В области 1650…1550 $см^{-1}$ наблюдается выраженная полоса. Она обусловлена одновременно деформационными колебаниями воды и колебаниями ароматического кольца. После эксплуатации интенсивность слегка уменьшается. Это может свидетельствовать об изменении гидратации функциональных групп.

Область 1200…1000 $см^{-1}$ наиболее важная часть спектра. Именно здесь располагаются полосы S = O, SO_3^-, С–N четвертичных аммониевых групп. На всех трех спектрах хорошо заметны изменения формы полос. Наиболее выраженные изменения наблюдаются именно после электродеионизации, что является косвенным подтверждением взаимодействия функциональных групп с ионами хрома.

Можно предположить, что происходит изменение электронного окружения сульфо- и аммониевых групп. При этом сами функциональные группы сохраняются. Именно такое изменение наиболее вероятно вызывает структурную перестройку, которую мы уже наблюдали по данным РФА.

В области 900 $см^{-1}$ расположены колебания ароматического кольца стирола и дивинилбензола. Во всех образцах положение полос практически совпадает. Это говорит о сохранении полимерной матрицы. Следовательно, электродеионизация не разрушает основу сополимера.

В таблице 2 приведены основные полосы, имеющие физико-химическое значение для смешанной ионообменной смолы. Очень слабые пики ниже 700 $см^{-1}$ и артефакты в области 1900…2200 $см^{-1}$ (связанные с атмосферным CO_2 и особенностями работы Фурье-спектрометра) рассмотрены не были, поскольку для обсуждения структуры смолы они неинформативны.

Таблица 2

Основные полосы ИК-спектров

Назначение полосы	Образец, $см^{-1}$		
	исходный	водонасыщенный	рабочий
ν(О–Н), связанная вода	≈3360…3390 (широкая)	≈3370…3400 (широкая)	≈3320…3360 (широкая)
δ(Н–О–Н), связанная вода	1640	1639	1648
Ароматическое кольцо (С=С)	1373; 1476	1412	1375; 1474
$\nu_{as}(SO_3^-)$, сульфогруппы	1186	1160	1176
ν(С–N), четвертичные аммониевые группы	1124	1123	(перекрывается с полосой 1176)
$\nu(SO_3^-)$/С–О	1035	1033	1009
Колебания ароматического кольца	1008	1006	1009

В полосах гидроксильных групп во всех образцах наблюдается широкая интенсивная полоса 3200…3500 $см^{-1}$. После эксплуатации максимум становится шире и несколько смещается в область меньших волновых чисел. Это свидетельствует об усилении водородных связей и изменении состояния связанной воды. Полученный результат хорошо согласуется с данными ДСК.

Полоса воды (около 1640 $см^{-1}$) смещается с 1640 до 1648 $см^{-1}$ после эксплуатации. Такое смещение обычно связывают с изменением гидратационного окружения функциональных групп.

Наиболее интересные изменения наблюдаются в полосе, обусловленной сульфогруппами. Полоса 1186…1176 $см^{-1}$ смещается после электродеионизации примерно на 10 $см^{-1}$. Такое смещение говорит о том, что электронное окружение группы SO_3^- изменилось за счет взаимодействия функциональных групп с ионами хрома и изменения распределения противоионов.

Валентные колебания (SO_3^-)/C–O подверглись наиболее заметному изменению. Смещение с 1035 до 1009 $см^{-1}$ почти на 26 $см^{-1}$ является значительным. Оно свидетельствует о существенном изменении локальной структуры функциональных групп.

Полосы ароматического кольца практически сохраняют свое положение, что было уже отмечено по данным РФА: полимерная основа смолы сохраняется, а изменения затрагивают главным образом функциональные группы и их ближайшее окружение.

Заключение

Исследование смешанной ионообменной смолы на основе сополимера стирола с дивинилбензолом до и после процесса электродеионизации технологического раствора, содержащего ионы хрома (VI), позволило установить особенности изменения ее структуры и свойств под действием электрического поля и процессов ионного обмена.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что все исследованные образцы сохраняют аморфный характер строения, при этом после эксплуатации наблюдается смещение аморфного максимума в область больших углов 2θ и уменьшение его ширины, что свидетельствует о локальном уплотнении полимерной сетки и повышении степени структурной упорядоченности без образования новых кристаллических фаз. Данные инфракрасной спектроскопии подтвердили сохранение химической природы стирол-дивинилбензольной матрицы и функциональных ионообменных групп. Вместе с тем выявлено смещение полос, соответствующих валентным колебаниям сульфогрупп ($–SO_3^-$), четвертичных аммониевых групп и связанной воды, что указывает на изменение их локального химического окружения вследствие взаимодействия с ионами хрома и перераспределения противоионов в процессе электродеионизации.

Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии показали изменение характера термических превращений смолы после эксплуатации. При этом существенного снижения термической устойчивости полимерной матрицы не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии ее разрушения. Выявленные различия обусловлены главным образом изменением содержания связанной воды и перестройкой локальной структуры функциональных групп.

Совокупность результатов трех независимых методов свидетельствует, что процесс электродеионизации при данных условиях эксплуатации не приводит к деградации полимерной основы смешанной ионообменной смолы. Основные изменения затрагивают локальную организацию функциональных групп и пространственную упаковку полимерной сетки, обусловленные взаимодействием

смолы с ионами хрома, изменением степени гидратации и перераспределением противоионов. Такие структурные преобразования сопровождаются уплотнением аморфной матрицы и изменением термического поведения материала при сохранении его общей химической и структурной целостности. Полученные результаты подтверждают возможность многократного использования исследуемой смешанной ионообменной смолы в процессах электродеионизационной очистки хромсодержащих технологических растворов и создают основу для дальнейшей оценки влияния эксплуатационных факторов на долговечность, сорбционные характеристики и эффективность регенерации ионообменных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ 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*). *Исследования проведены с применением оборудования ЦКП* «*Получение и применение полифункциональных наноматериалов*» *ТГТУ* (*Тамбов*).

Список литературы

1. Мамедова, Р. И. Влияние хрома (VI) на окружающую среду и здоровье: технологии очистки сточных вод / Р. И. Мамедова, А. С. Чантаева // Вестник науки. – 2024. – Т. 3, № 11(80). – С. 1301–1309.

2. Колесникова, И. В. Влияние шестивалентного хрома на живые организмы / И. В. Колесникова // Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов : сборник докладов III Международной молодежной научной конференции, Белгород, 10–11 ноября 2015 года. Том Часть 1. – Белгород, 2015. – С. 219–223.

3. Слесаренко, В. В. Анализ реагентных методов утилизации хромсодержащих отходов гальванического производства / В. В. Слесаренко, А. А. Юдаков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2023. – № 4(90). – С. 43–57. doi: 10.17277/voprosy.2023.04.pp.043-057

4. 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.

5. Analyzing ion transport in Cr(VI) removal by electrodeionization: modeling and experiiental study / K. Castillo, F. Rodriguez, S. Lezama-Alvarez, E. Rivero // Separation and Purification Technology. – 2026. – Vol. 382, Part 1. – P. 135771. doi: 10.1016/j.seppur.2025.135771

6. Сравнительная оценка процессов электродиализа и электродеионизации / М. Р. Яковлева, О. К. Никулина, О. В. Колоскова, О. В. Дымар // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2023. – Т. 16, № 4(62). – С. 61–68.

7. Alvarado, L. Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications / L. Alvarado, A. Chen // Electrochimica Acta. – 2014. – Vol. 132. – P. 583–597.

8. Голубенко, Д. В. Оценка эффективности ионитов для процесса электродеионизации / Д. В. Голубенко, Я. Кривчик, А. Б. Ярославцев // Мембраны и мембранные технологии. – 2015. – Т. 5, № 4. – С. 254. doi: 10.1134/S2218117215040057

9. Regeneration and modelling of a phosphorous removal and recovery hybrid ion exchange resin after long term operation with municipal wastewater / D. Pinelli,

S. Bovina, G. Rubertelli, A. Martinelli, S. Guida, A. Soares, D. Frascari // Chemosphere. – 2022. – Vol. 286, Part 1. – P. 131581. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131581

10. Current Trends in Development and Use of Polymeric Ion-Exchange Resins in Wastewater Treatment / N. Marin, M. Nita-Lazar, M. Popa, T. Galaon, L. Pascu // Materials. – 2024. –Vol. 17. – P. 5994. doi: 10.3390/ma17235994

11. Alvarado, L. Investigation of Current Routes in Electrodeionization System Resin Beds During Chromium Removal / L. Alvarado, I. Rodriguez-Torres, P. Balderas // Electrochimica Acta. – 2025. – Vol. 182. – P. 763–768. doi: 10.1016/j.electacta. 2015.09.124

12. Исследования вольт-амперных характеристик в процессе электродеионизационной очистки промышленных растворов от хромсодержащих веществ / О. С. Филимонова, И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, К. В. Брянкин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2024. – № 2(92). – С. 53–63. doi: 10.17277/voprosy.2024.02.pp.053-063

13. Хорохорина, И. В. Эффективность технологической схемы очистки хромсодержащих промышленных растворов с применением электродеионизационных и электродиализных методов разделения / И. В. Хорохорина, О. С. Филимонова, С. И. Лазарев // Вестник Технологического университета. – 2026. – Т. 29, № 5. – С. 24–29. doi: 10.55421/3034-4689_2026_29_5_24

14. ГОСТ 20298–2022. Смолы ионообменные. Катиониты. Технические условия : введен 2023-03-01. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 16 с. – URL : https://files.stroyinf.ru/Data/788/78832.pdf (дата обращения: 30.07.2026)

15. ГОСТ 20301–2022. Смолы ионообменные. Аниониты. Технические условия : введен 2023-03-01. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 20 с. – URL : https://files.stroyinf.ru/Data/788/78850.pdf (дата обращения: 30.07.2026)

Amorphous-Crystalline Changes in Ion-Exchange Resin after Electrodeionization Purification of Chromium-Containing Solutions

© I. V. Khorokhorina[1], O. S. Filimonova[2] ✉, S. I. Lazarev[2], T. P. Dyachkova[3], K. V. Bryankin[4], G. S. Baronin[2], P. N. Bernatsky[5]

[1] *Department of Nature Management and Environmental Protection;*
[2] *Department of Mechanics and Engineering Graphics, nauka2613@mail.ru;*
[3] *Department of Engineering and Technology for the Production of Nanoproducts;*
[4] *Department of Chemistry and Chemical Technology; TSTU, Tambov, Russian Federation;*
[5] *Department of Chemistry, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation*

Keywords: differential scanning calorimetry; infrared spectroscopy; ion-exchange resin; electrodeionization process; X-ray phase analysis; thermogravimetry; chromium-containing process solution.

Abstract: The results of a comprehensive study on the structural changes of a mixed-bed ion-exchange resin based on a styrene-divinylbenzene copolymer following the electrodeionization purification of a process solution containing chromium (VI) ions are presented. Pristine, water-saturated, and working resin samples were investigated using infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, thermogravimetry, and X-ray phase analysis. It has been established that

electrodeionization does not cause degradation of the polymer matrix: the resin retains its amorphous structure and the chemical nature of its functional groups. However, localized structural rearrangements were observed: a shift of the amorphous peak in X-ray diffraction patterns toward higher 2θ angles, a narrowing of this peak, changes in the shapes of IR spectral bands corresponding to sulfo and ammonium groups, and a more complex thermal degradation process characterized by the appearance of multi-stage exothermic effects. These changes are attributed to the interaction of functional groups with chromium ions, the redistribution of counterions, and alterations in the resin's hydration. The results demonstrate the preservation of the material's integrity and confirm the feasibility of reusing the resin in electrodeionization processes for the purification of chromium-containing solutions.

References

1. Mamedova R.I., Chantayeva A.S. [The impact of chromium (VI) on the environment and health: wastewater treatment technologies], *Vestnik nauki* [Bulletin of science], 2024, vol. 3, no. 11(80), pp. 1301–1309. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kolesnikova I.V. *Ekologiya i ratsional'noye prirodopol'zovaniye agropromyshlennykh regionov: sbornik dokladov III Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Ecology and rational nature management of agro-industrial regions: collection of reports of the III International Youth Scientific Conference], Belgorod, November 10-11, 2015, vol, Part 1, Belgorod, 2015, pp. 219-223. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Slesarenko V.V., Yudakov A.A. [Analysis of reagent methods for recycling chromium-containing waste from galvanic production], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2023, no. 4(90), pp. 43-57. doi: 10.17277/voprosy.2023.04.pp.043-057 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Abonosimov D.O., Lazarev S.I. [Application of membrane technologies in the treatment of wastewater from galvanic production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 306-313. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Castillo K., Rodriguez F., Lezama-Alvarez S., Rivero E. Analyzing ion transport in Cr(VI) removal by electrodeionization: modeling and experishental study, *Separation and Purification Technology*, 2026, vol. 382, part 1, pp. 135771. doi: 10.1016/j.seppur.2025.135771

6. Yakovleva M.R., Nikulina O.K., Koloskova O.V., Dymar O.V. [Comparative assessment of electrodialysis and electrodeionization processes], *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii* [Food industry: science and technology], 2023, vol. 16, no. 4(62), pp. 61-68. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Alvarado L., Chen A. Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications, *Electrochimica Acta*, 2014, vol. 132, pp. 583-597.

8. Golubenko D.V., Krivchik Ya., Yaroslavtsev A.B. [Evaluation of the efficiency of ion exchangers for the electrodeionization process], *Membrany i membrannyye tekhnologii* [Membranes and membrane technologies], 2015, vol. 5, no. 4, pp. 254. doi: 10.1134/S2218117215040057 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Pinelli D., Bovina S., Rubertelli G., Martinelli A., Guida S., Soares A., Frascari D. Regeneration and modelling of a phosphorous removal and recovery hybrid ion exchange resin after long term operation with municipal wastewater, *Chemosphere*, 2022, vol. 286, part 1, pp. 131581. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131581

10. Marin N., Nita-Lazar M., Popa M., Galaon T., Pascu L. Current Trends in Development and Use of Polymeric Ion-Exchange Resins in Wastewater Treatment, *Materials*, 2024, vol. 17, pp. 5994. doi: 10.3390/ma17235994

11. Alvarado L., Rodriguez-Torres I., Balderas P. Investigation of Current Routes in Electrodeionization System Resin Beds During Chromium Removal, *Electrochimica Acta*, 2025, vol. 182, pp. 763-768. doi: 10.1016/j.electacta.2015.09.124

12. Filimonova O.S., Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bryankin K.V. [Studies of current-voltage characteristics during electrodeionization purification of industrial solutions from chromium-containing substances], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2024, no. 2(92), pp. 53-63. doi: 10.17277/voprosy.2024.02.pp.053-063 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Khorokhorina I.V., Filimonova O.S., Lazarev S.I. [Efficiency of the process flow chart for cleaning chromium-containing industrial solutions using electrodeionization and electrodialysis separation methods], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2026, vol. 29, no. 5, pp. 24-29. doi: 10.55421/3034-4689_2026_29_5_24 (In Russ., abstract in Eng.)

14. GOST 20298-2022. *Smoly ionoobmennyye. Kationity. Tekhnicheskiye usloviya* [Ion-exchange resins. Cation exchangers. Specifications], Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022, 16 p., available at: https://files.stroyinf.ru/Data/788/78832.pdf (accessed 30 July 2026).

15. GOST 20301-2022. *Smoly ionoobmennyye. Anionity. Tekhnicheskiye usloviya* [Ion-exchange resins. Anion exchangers. Specifications], Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022, 20 p., available at: https://files.stroyinf.ru/Data/788/78850.pdf (accessed 30 July 2026).

Amorphe-kristalline Veränderungen in Ionenaustauschharz nach der Elektrodeionisationsreinigung chromhaltiger Lösungen

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der umfassenden Studie zu Strukturveränderungen des gemischten Ionenaustauscherharzes auf Basis des Styrol-Divinylbenzol-Copolymers nach elektrochemischer Reinigung der Chrom(VI)-Ionen enthaltenden Prozesslösung vorgestellt. Mittels Infrarotspektroskopie, dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC), Thermogravimetrie (TGA) und Röntgenbeugungsanalyse (XRD) sind die Ausgangsproben, die wassergesättigten Proben und die Proben im Arbeitseinsatz untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Elektrolyse nicht zu einem Abbau der Polymermatrix führt: das Harz behält seine amorphe Struktur und die chemische Natur seiner funktionellen Gruppen. Allerdings waren lokale Strukturveränderungen beobachtet: die Verschiebung des amorphen Maximums im Röntgenbeugungsmuster zu größeren 2θ-Winkeln, die Verringerung seiner Breite, die Veränderung der Form der IR-Spektralbanden, die Sulfo- und Ammoniumgruppen zugeordnet sind, sowie die Komplexität des thermischen Abbaus mit dem Auftreten mehrstufiger exothermer Effekte. Die beobachteten Veränderungen beruhen auf der Wechselwirkung funktioneller Gruppen mit Chromionen, der Umverteilung von Gegenionen und Veränderungen der Harzhydratation. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Integrität des Materials erhalten bleibt und rechtfertigen die Möglichkeit der wiederholten Verwendung des Harzes in elektrochemischen Reinigungsverfahren für chromhaltige Lösungen.

Changements cristallins amorphes dans la résine échangeuse d'ions après la purification par électrodéionisation des solutions contenant du chrome

Résumé: Sont présentés les résultats d'une étude approfondie des modifications structurelles de résine d'ionétique mixte à la base de copolymère de styrol et de divinylbenzène après la purification d'électrodéionisation d'une solution technologique contenant des ions de chrome (VI). Sont étudiés des échantillons de résine initiale, saturée d'eau et en condition de travail par des méthodes de spectroscopie infrarouge, calorimétrie à balayage différentiel, thermogravimétrie et l'analyse de phase à rayons X. Est établi que l'électrodéionisation ne conduit pas à la destruction de la matrice polymère: la résine conserve la structure amorphe et la nature chimique des groupes fonctionnels. Cependant, des réarrangements structurels locaux sont identifiés: déplacement du maximum amorphe sur les diffractogrammes de rayons x dans la zone des grands angles 2θ, rétrécissement de la largeur, changement de la forme des bandes des spectres IR correspondant aux groupes sulfo et ammonium, ainsi que la complication de la thermodestruction avec l'apparition d'effets exothermiques en plusieurs étapes. Les modifications observées sont dues à l'interaction des groupes fonctionnels avec les ions de chrome, à la redistribution des contre-ions et à l'altération de l'hydratation du résine. Ces résultats attestent de la préservation de l'intégrité du matériau et justifient la possibilité d'une utilisation multiple de la résine dans les procédés de purification par déionisation électrique des solutions contenant du chrome.

Авторы: ***Хорохорина Ирина Владимировна*** – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; ***Филимонова Ольга Сергеевна*** – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; ***Лазарев Сергей Иванович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; ***Дьячкова Татьяна Петровна*** – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; ***Брянкин Константин Вячеславович*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; ***Баронин Геннадий Сергеевич*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; ***Бернацкий Павел Николаевич*** – доктор химических наук, доцент, доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 621.921
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.505-515

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПАУНД-ПРОТЕКТОРА НА АБРАЗИВ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ДЛЯ ПОДВОДНОГО ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

© Г. В. Барсуков[1] ✉, К. Ю. Фроленков[1], А. С. Фетисов[1], В. В. Власов[1], А. В. Петрухин[1]

[1] *Научно-исследовательская лаборатория «Новые абразивные материалы», awj@list.ru; ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», Орел, Российская Федерация*

Ключевые слова: абразив; гидроабразивное резание; инкапсуляция; компаунд-протектор; псевдоожиженный слой.

Аннотация: Представлены результаты моделирования влиянии физических свойств абразивных частиц на скорость воздушного потока, обеспечивающего их псевдоожижение для нанесения полимерного компаунд-протектора для подводного гидроабразивного резания, а также результаты математического моделирования процесса разгона абразивных частиц в псевдоожиженном слое на основе решения полученных уравнений движения. Проведен анализ методов математического моделирования, применимых для описания процесса псевдоожижения сыпучих материалов.

Введение

Эффективность технологии гидроабразивного резания во многом зависит от используемого абразивного материала, который смешивается со струей воды в сопле и подается в зону взаимодействия с обрабатываемым материалом. Абразив играет ключевую роль в этом методе обработки, оказывая значительное влияние на конечный результат: качество реза, скорость процесса, максимальную толщину прорезаемого материала и долговечность фокусирующей трубки сопла [1, 2]. Наиболее распространенным абразивом, используемым на практике, традиционно является гранатовый песок.

Проблема износа сопла представляет собой существенное затруднение при проведении гидроабразивной резки, особенно в подводных условиях [3]. Это обстоятельство диктует необходимость его периодической замены, обычно каждые 50…100 ч эксплуатации в тяжелых условиях. Еще одним недостатком является то, что замена изношенных компонентов сопла требует временной остановки процесса резки, после чего возобновление работы происходит с точки, где процесс был прерван.

Ввиду вышеизложенного, исследования, нацеленные на модернизацию абразивного материала, используемого для подводной гидроабразивной резки, представляются актуальными с точки зрения как науки, так и практики, поскольку они способствуют увеличению срока службы конструктивных частей оборудования. Авторами данной публикации предлагается создать новый абразив, оснащенный полимерной защитной оболочкой (покрытием) – компаунд-протектором, нанесен-

ной на поверхность каждого абразивного зерна, которая призвана минимизировать негативное воздействие абразивных частиц на внутренние поверхности систем подводной гидроабразивной установки [4, 5]. Для нанесения покрытия на абразив может применяться разнообразное оборудование. Среди наиболее часто используемых в различных отраслях промышленности конструкций можно выделить установки с чашечным (вращающимся) типом действия и системы, работающие на основе псевдоожиженного слоя. Последние, обеспечивают более высокое качество нанесения покрытий и повышенную производительность сушки. Псевдоожиженный слой по методу Вурстера является наиболее распространенным типом оборудования для формирования пленочных покрытий на частицах мелкого размера [6, 7].

В установке типа колонны Вурстера предусмотрена цилиндрическая трубка *1*, размещенная внутри камеры с псевдоожиженным слоем *2* (рис. 1). Пространство между трубкой *1* и нижней перфорированной пластиной *3* регулирует поток воздуха *4*, направляемый как внутрь трубки *1*, так и в основную камеру *2*. Воздух, движущийся через внутреннюю трубку, имеет большую скорость по сравнению с потоком в главной части камеры. В процессе нанесения покрытия, под действием восходящего потока воздуха, твердые частицы перемещаются внутри этой цилиндрической трубки.

Процесс нанесения покрытия на частицы происходит в пределах цилиндрической трубки. Полимерное покрытие подается распылительной головкой, расположенной по центру распределительной пластины. Частицы, высыхая, поднимаются в верхнюю, фонтанирующую зону, где их скорость снижается, и они опускаются к стенкам камеры. После этого они вновь подхватываются потоком воздуха через зазор между трубкой и пластиной и возвращаются в зону распыления. Данный цикл движения твердых частиц продолжается до достижения требуемой толщины покрытия.

Однако движение частиц в псевдоожиженном слое при распылении является сложным процессом, включающим столкновения между частицами, теплообмен и сушку, а также другие процессы [8], которые могут привести к неравномерности покрытия и агломерации [9]. Таким образом, распределение частиц по времени пребывания в зоне обработки и распределение частиц по времени цикла являются важными параметрами для достижения требуемых характеристик роста покрытия на частицах. Для обеспечения эффективности процесса псведоожижения многими авторами проведены исследования свойств частиц и покрытий.

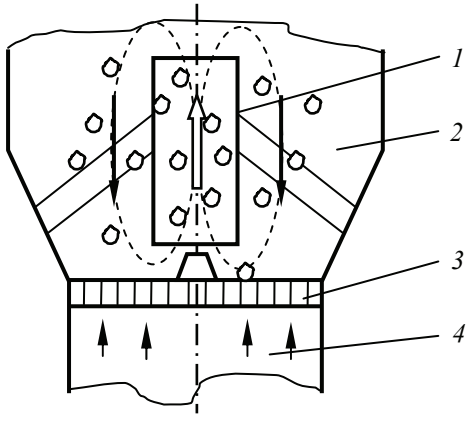


Рис. 1. Схема колонны Вурстера

Авторы работ [10, 11] изучали процессы нанесения покрытий с использованием органических растворов и растворов неорганических солей. Они обнаружили, что скорость псевдоожижения является наиболее значимым фактором, влияющим на стабильность цикла частиц и кинетику роста. При недостаточной скорости воздушного потока частицы концентрируются в нижней части псевдоожиженного слоя, что приводит к их плохому распределению, более длительному времени высыхания капель, неоднородному росту частиц и агломерации.

Изучение процессов, связанных с формированием полимерного покрытия на абразивных частицах, а также особенностей его структуры и механизмов роста остается актуальной и недостаточно исследованной областью.

Цель работы – анализ методов математического моделирования, применяемых для описания процесса псевдоожижения сыпучих материалов.

В рамках исследования получены данные о влиянии физических свойств абразивных частиц на скорость воздушного потока, обеспечивающего их псевдоожижение, и представлены результаты компьютерного моделирования этих зависимостей.

Статистическое моделирование псевдоожиженного слоя

Воздушный поток в активной зоне является турбулентным. Турбулизации способствуют как сетка, через которую закачивается воздух, так и твердые частицы, образующие твердую фазу псевдоожиженного слоя [12]. Турбулентность воздушного потока приводит к случайности движения как твердых, так и жидких частиц. При этом скорости твердых, жидких и газообразных частиц не совпадают между собой. Это является причиной столкновения жидких и твердых частиц, которое необходимо для нанесения на последние покрытия. Математическое описание процессов движения всех сред осуществляется, в зависимости от решаемых задач, на основании целого набора различных моделей. Этому посвящено много работ, например [13, 14].

Один из подходов использует аналогию движения частиц твердой и распыляемой фаз со случайным тепловым движением молекул газа. Такое движение описывается кинетической теорией газов [15]. Базовым является кинетическое уравнение для функции распределения частиц среды по их положениям в фазовом пространстве – объединении геометрического пространства и пространства скоростей.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla_{\vec{r}} + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{c}} \right) f(\vec{r}, \vec{c}, t) = J , \qquad (1)$$

где t – время; $\vec{r} = \vec{r}(t)$ – радиус-вектор материальной точки, моделирующей движущуюся частицу, в момент времени t; $\vec{c} = d\vec{r}/dt$, $\vec{a} = d\vec{c}/dt$ – ее скорость и ускорение в этот момент; $\nabla_{\vec{r}} \equiv d/d\vec{r}$ – дифференциальный оператор Гамильтона по аргументу $\vec{r}$, $\nabla_{\vec{c}} \equiv d/d\vec{c}$ – по аргументу $\vec{c}$; J – столкновительный член уравнения; $f(\vec{r}, \vec{c}, t)$ – функция плотности распределения частиц; $(\cdot)$ – знак свертки – скалярного умножения.

Уравнение (1) является балансовым. Оно характеризует скорость изменения числа частиц n в единице объема $d\Gamma$ фазового пространства в окрестности точки $(\vec{c}, \vec{r}) \in \Gamma$, произошедшее из-за парных и тройных столкновений материальных частиц, составляющих рассматриваемую среду.

Целью статистического подхода является получение функции плотности распределения частиц $f(\vec{r},\vec{c},t)$ по скоростям и координатам в шестимерном фазовом пространстве, образованном этими векторными величинами. Знание этой функции дает возможность описать осредненные движения твердых и жидких частиц, определить вероятность их столкновений. Частным случаем статистического подхода является ситуация, когда столкновительным членом можно пренебречь, а интерес представляет только распределение частиц по скоростям. В этом случае в качестве $f(\vec{r},\vec{c},t)$ используется распределение Максвелла

$$f(\vec{c}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mc^2}{2kT}\right), \tag{2}$$

где k – постоянная Больцмана; T – аналог температуры дискретной среды, вычисляемый через среднюю кинетическую энергию частиц, которая должна быть определена из других рассуждений.

Такой подход позволяет оценить средние скорости движения частиц в равновесном состоянии, ввести в рассмотрение характеристики сплошной газовой среды, моделирующей дискретную среду.

Второй подход состоит в непосредственном применении моделей, разработанных для описания различных диффузионных процессов. При этом обычно рассматривается стандартное диффузионное уравнение общего вида, решением которого является функция распределения частиц по координатам

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D\Delta\varphi, \tag{3}$$

где φ – концентрация частиц рассматриваемой среды; D – коэффициент диффузии этого вещества в окружающей среде; Δ – дифференциальный оператор Лапласа (Лапласиан).

Распределение частиц по скоростям в рамках данной модели исключается из рассмотрения. Такой подход дает возможность оценить неравномерность пространственного распределения твердой и жидкой фаз в воздушном потоке, создающем псевдоожиженный слой. В частности, изучение процесса переноса массы с помощью уравнения диффузии состоит в анализе поведения взвеси вблизи твердой поверхности, около которой значение концентрации целевого компонента отличается от концентрации в основном потоке.

Третий подход основан на использовании моделей, разработанных в классической механике сплошной среды. Здесь для каждой из сплошных сред – газа и твердой фазы – записывается группа уравнений гидромеханики, включающая среди прочих уравнения Навье–Стокса и уравнение неразрывности со своими граничными условиями. В векторном виде уравнения записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}(\Delta\vec{v}) + \vec{F}; \tag{4}$$

$$\nabla\cdot(\rho\vec{v}) = 0 \tag{5}$$

(в этих выражениях использованы статистические связи между макро- и микрохарактеристиками движения исследуемой среды),
где

$$\vec{v} = \frac{1}{n}\int \vec{c}\, f(\vec{r},\vec{c},t)\, d^3\vec{c} \tag{6}$$

континуальная скорость – средняя по элементарному объему геометрического пространства; $\vec{F}$ – объемная плотность внешних сил, с учетом дискретности среды – это сумма всех внешних сил, приложенных к частицам среды, находящихся в единице ее объема.

Моделирование процесса разгона абразивных частиц в кипящем слое

С целью определения характера движения твердых частиц в псевдоожиженном слое, выявления связи толщины слоя со скоростью вдува воздуха, оценки роли каждой из сил, действующих на частицу (кроме силы столкновения), рассматривается движение одной из них в вертикальном (вдоль потока) направлении. Предварительно делается оценка величины вклада каждой из сил. Задача ставится следующим образом. Частица твердой фазы известной формы, размеров и материала лежит неподвижно (одна, без влияния соседей) на дне канала – сетке, через которую в нулевой начальный момент времени мгновенно с конечной скоростью начинает вдуваться воздух. Под его действием частица двигается вверх, достигнув определенной высоты, начинает обратное движение. Все движение надо описать. На каждую частицу, находящуюся в слое, действуют четыре силы: сила тяжести, направленная вниз; выталкивающая (архимедова) сила, направленная вверх и имеющая очень небольшое значение, ею в расчетах можно пренебречь; сила гидродинамического воздействия газового потока, направленная вверх. Первые две силы – тяжести и архимедова – не зависят от скорости потока. Третья же сила – гидродинамическая – увеличивается по мере увеличения скорости газа. Поэтому при достижении некоторой скорости сила гидродинамического воздействия станет равной силе тяжести и преодолеет четвертую силу – силу сцепления с соседними частицами. Происходит качественное изменение ситуации: частички оказываются поднятыми потоком газа, взвешенными в нем. Для рассматриваемых частиц и воздуха использовались следующие данные:

– плотность материала $\rho_{(2)} = 3{,}21 \cdot 10^3$ кг/м^3;

– радиус $r_a = 200$ мкм $= 2 \cdot 10^{-4}$ м;

– масса частиц $m = 30 \cdot 10^{-9}$ кг.

Уравнение движения отдельной частицы, не взаимодействующей с другими частицами, в рассматриваемом случае имеет следующий вид:

$$m \frac{d\vec{v}_p}{dt} = 6\pi r_a \mu (\vec{v} - \vec{v}_p) + (m - \rho V_p)\vec{g}, \qquad (7)$$

где $\vec{v}_p$ – скорость частицы; V_p – ее объем; $\vec{v}$ – скорость потока воздуха, в котором движется частица; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; μ – динамическая вязкость воздуха, принята равной $\mu = 20 \cdot 10^{-6}$ Па$\cdot$с; ρ – плотность воздуха, $\rho = 1{,}5$ кг/м^3, первое слагаемое правой части представляет собой силу сопротивления частицы разгоняющему ее воздушному потоку (сила Стокса); второе слагаемое равно разности веса частицы и силы Архимеда.

Уравнение записано в векторной форме, так как в различных ситуациях направления движения отдельных частиц, ускорения свободного падения и воздушного потока могут быть разными.

Уравнение (7) написано для случая, когда поток воздуха разгоняет частицу. Если же этот поток тормозит ее, то вид уравнения движения частицы изменится и приобретет следующий вид:

$$m\frac{d\vec{v}_p}{dt} = 6\pi r_a \mu(\vec{v}_p - \vec{v}) + (m - \rho\ V_p)\vec{g}\ . \qquad (8)$$

Здесь знак первого слагаемого правой части изменился на противоположный.

Далее рассматривается движение частицы вдоль восходящего воздушного потока вверх, с помощью уравнения (7) до ее остановки, и вниз, под действием силы тяжести с помощью уравнения (8). В первом случае начальная скорость считается равной нулю, начальное положение задано в пределах насыпного слоя. Во втором случае начальная скорость также равна нулю, а начальное положение соответствует той высоте, на которую она поднялась из насыпного слоя. Оба движения одномерны. Поэтому используется скалярная форма уравнений. Для первой ситуации задача Коши имеет вид:

$$\begin{aligned} &m\frac{dv_p}{dt} + 6\pi r_a \mu v_p = 6\pi r_a \mu U - m\ g; \\ &\frac{dx_p}{dt} = v_p; \qquad (9) \\ &v_p(0) = 0; \quad x_p(0) = h_1. \end{aligned}$$

В этой системе и далее силу Архимеда для абразивных частиц не учитываем из-за ее малости по сравнению с весом частицы.

Решение системы (9) имеет следующий вид:

$$v_p = \left(U - \frac{mg}{6\pi r_a \mu}\right)\left(1 - e^{-\frac{6\pi r_a \mu}{m}t}\right); \qquad (10)$$

$$x_p = \left(U - \frac{mg}{6\pi r_a \mu}\right)\left[t - \frac{m}{6\pi r_a \mu}\left(1 - e^{-\frac{6\pi r_a \mu}{m}t}\right)\right] + h_1\,. \qquad (11)$$

Для определения требуемой скорости восходящего воздушного потока в камере установки псевдоожижения разработан программный комплекс, позволяющий вычислить ключевые рабочие параметры псевдоожижения для заданного типа и размера частиц. В качестве входных данных для расчетов использовались размеры абразивного материала, процентное содержание конкретных фракций и число псевдоожижения.

Поскольку слой абразива включает частицы различного диаметра, был вычислен их средний размер. На представленном на рис. 2 графике показана зависимость скорости воздушного потока от частиц среднего диаметра, где w_kp1 обозначает скорость начала «кипения» слоя абразивного материала. Учитывая, что для гидроабразивной резки преимущественно используется абразив с диаметром от 100 до 400 мкм, расчеты проводились именно для этих значений.

Анализ графика показывает, что для подъема частиц со средним диаметром 100 мкм требуется скорость потока порядка 0,01 м/с. Это означает, что при достижении данной скорости сопротивление слоя абразива уравнивается с весом самого слоя, частицы перестают сдавливать друг друга и слой переходит во взвешенное состояние. Для поднятия более крупных частиц, например, диаметром 400 мкм, необходима скорость потока, увеличенная до 0,05 м/с.

Кроме того, была рассчитана вторая критическая скорость, w_kp2 (скорость окончания псевдоожижения), для наименьшего диаметра частицы в выборке. Для таких частиц скорость псевдоожижения практически соответствует пределу существования взвешенного слоя, совпадая со скоростью витания самой частицы.

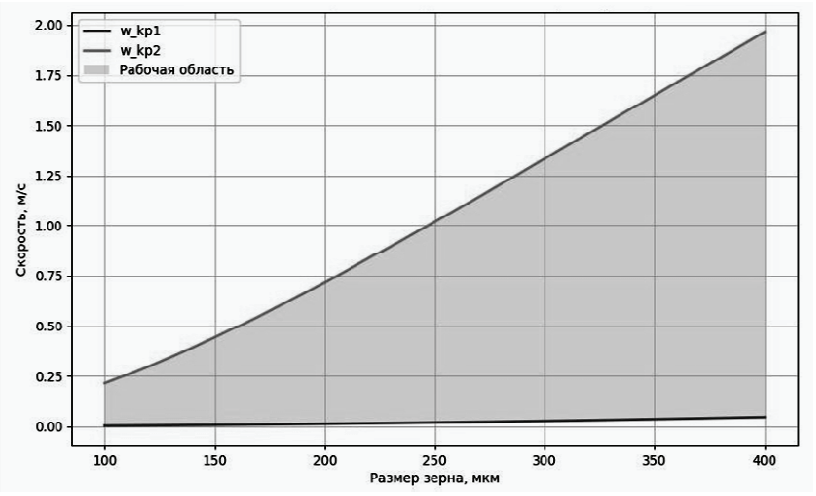


Рис. 2. Зависимость скорости псевдоожижения от среднего диаметра абразивного зерна

В рамках выполненных расчетов она составляет от 0,25 до 1,8 м/с. При превышении этой скорости псевдоожиженный слой перестает формироваться. Таким образом, проведенные расчеты позволили установить оптимальный диапазон скоростей воздушного потока для формирования псевдоожиженного слоя.

Заключение

В выражениях (9) – (11) в случае, когда $U < \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$, движения частиц из насыпного слоя вверх нет. Это продолжается до тех пор, пока не будет выполняться обратное неравенство. Сказанное соответствует существующим представлениям о развитии псевдоожиженного слоя по мере роста скорости U. Состояние слоя может быть представлено в виде зависимости гидравлического сопротивления слоя Δp от скорости потока воздуха, поступающего снизу под насыпной слой (рис. 3).

По мере возрастания скорости U воздушного потока увеличивается гидравлическое сопротивление неподвижного слоя (линия *1*) или в обратном направлении (линия *2*) (см. рис. 3, *б*). Начало псевдоожижения при критической скорости воздушного потока

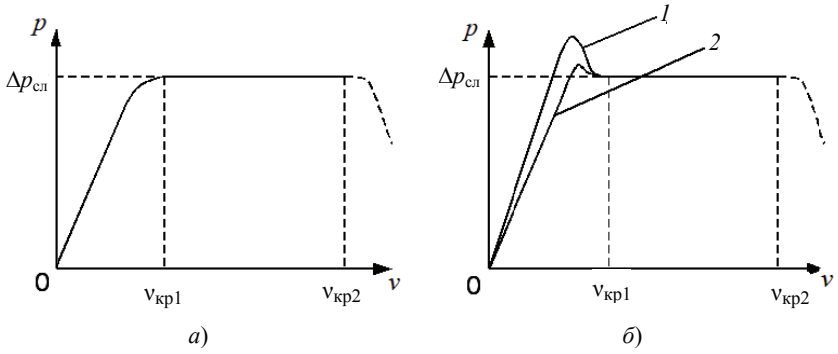


Рис. 3. Влияние скорости воздушного потока на гидравлическое сопротивление при прохождении через однородный слой твердых частиц для идеального случая (*а*) и для реальных условий (*б*)

$v_{кр} = U = \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$ наступает, когда силы сопротивления равна весу частицы. Однако для создания псевдоожиженного слоя необходимо «разведение» частиц насыпного слоя друг от друга на некоторое расстояние, то есть поднять их над дном камеры. Для этого на короткий отрезок времени следует выполнить неравенство $U > \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$, заставляющее частицы «витать» в пространстве камеры (небольшой бугорок на линии *1*, см. рис. 3, *б*), а затем вернуть значение U к величине $v_{кр}$, чтобы предотвратить унос частиц.

Для рассматриваемых в работе частиц абразива справедлива оценка

$$\frac{m}{6\pi r_a \mu} \approx 0{,}3c\,.$$

Следствием этого является, при $U > \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$, обращение в ноль $\left(e^{-\frac{6\pi r_a \mu}{m}t} \approx 0\right)$ через малый отрезок времени, порядка $t \approx 1\,\text{с}$. Это то время, соответствующее «малому бугорку» линии *1* (см. рис. 3, *б*), в течение которого возникает витание абразивных частиц и создается псевдоожиженный слой.

При нанесении полимерного покрытия на абразивные частицы при одновременном отсутствии их слипания в комки важен энергетический анализ взаимных соударений частиц. Причиной соударения абразивных частиц является турбулентность потока воздуха, создающего псевдоожиженный слой. Возникающие при турбулизации глобулы воздушной массы, двигающиеся навстречу друг другу, подхватывают витающие частицы и разгоняют их, приводя к столкновению. Процесс разгона можно анализировать на основе решения уравнений (10), (11).

Работа выполнена в рамках государственного задания проект № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001).

Список литературы

1. Sitek, L. Abrasives and possibilities of increase in efficiency of abrasive waterjets / L. Sitek, P. Martinec // Science Journal. – 2016. – Vol. 3. – P. 877–881. doi: 10.17973/MMSJ.2016_03_201603

2. Барсуков, Г. В. Исследование абразивной способности искусственных и природных абразивов, обеспечивающих производительность гидроабразивного резания / Г. В. Барсуков, О. Г. Кожус, А. Ю. Винокуров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 2(328). – С. 34–40.

3. Mugla, D. R. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting / D. R. Mugla, A. L. Galinovskiy, N. V. Kobernik // In book: Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. – 2019. – P. 267–276. doi: 10.1007/978-3-319-95630-5_29

4. Жизненный цикл абразивного зерна в полимерной оболочке в процессе гидроабразивной резки / Г. В. Барсуков, В. С. Шоркин, Л. Ю. Фроленкова, О. Г. Кожус // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 6(338). – С. 72–79.

5. Obtaining the Dependences of the Contact of the Composite Abrasive Material with the Nozzle Walls, which Reduces the Wear of the Focusing Tube of the Waterjet

Installation / O. Kozhus, G. Barsukov, V. Shorkin, Yu. Stepanov // Materials Science Forum, Krasnoyarsk, Russian Federation, 20–21 November 2020. – 2021. – Vol. 1031. – P. 160–165. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.160

6. Monte Carlo simulations to determine coating uniformity in a Wurster fluidized bed coating process / Ku Zilati Ku Zhaari, P. Pandey, Y. Song, R. Turton // Powder Technology. – 2006. – Vol. 166, No. 2. – P. 81–90. doi: 10.1016/j.powtec.2006.05.001

7. Particle circulation and coating in a Wurster fluidized bed under different geometries / J. Guo, D. Liu, J. Ma, C. Liang, X. Chen // Powder Technology. – 2024. – Vol. 433. – Art. 119223. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119223

8. Simulation of a Wurster fluidized bed by CFD-DEM with a cohesive contact model / H. Li, D. Liu, J. Ma, X. Chen // Chemical Engineering Research and Design. – 2022. – Vol. 177, No. 1. – P. 157–166. doi: 10.1016/j.cherd.2021.10.038

9. Kozhus, O. The research of the Agglomeration Process During the Formation of an Abrasive-Polymer Compound for Waterjet Cutting in a Fluidized bed Installation / O. Kozhus, G. V. Barsukov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117. – P. 2511–2518. doi: 10.1007/s00170-021-07140-0

10. Fluidized Bed Coating and Granulation: Influence of Process-Related Variables and Physicochemical Properties on the Growth Kinetics / M. Hemati, R. Cherif, K. Saleh, V. Pont // Powder Technology. – 2003. – Vol. 130, No. 1-3. – P. 18–34. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00221-8

11. Zhang, R. Novel Technique for Coating of Fine Particles Using Fluidized Bed and Aerosol Atomizer / R. Zhang, T. Hoffmann, E. Tsotsas // Processes. – 2020. – Vol. 8, No. 12. – Art. 1525. doi: 10.3390/pr8121525

12. Сеточная турбулентность в двухфазном потоке: влияние параметров несущей среды и частиц / А. И. Картушинский, Ю. А. Руди, С. В. Тислер, М. Т. Хусаинов, И. Н. Щеглов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 292–298. doi: 10.1134/S0018151X09020187

13. Experimental Investigation and CFD Simulation of Top Spray Fluidized Bed Coating System / S. H. Seyedin, M. Ardjmand, A. A. Safekordil, S. Raygan // Periodica Polytechnica Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 61, No. 2. – P. 117–127. doi: 10.3311/PPch.8611

14. Математическая модель псевдоожижения бинарной смеси частиц / А. В. Митрофанов, А. В. Огурцов, В. А. Магницкий, В. Е. Мизонов, K. Tannous // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 1. – С. 45–47.

15. Ферцигер, Дж. Математическая теория процессов переноса в газах : пер. с англ. / Дж. Ферцигер, Г. Капер ; под ред. Д. Н. Зубарева, А. Г. Башкирова. – Москва : Мир, 1976. – 554 с.

Modeling the Application of a Polymer Protective Compound onto Abrasive Particles in a Fluidized Bed for Underwater Abrasive Water-Jet Cutting

© G. V. Barsukov[1] ✉, K. Yu. Frolenkov[1], A. S. Fetisov[1], V. V. Vlasov[1], A. V. Petrukhin[1]

[1] *Research Laboratory New Abrasive Materials, awj@list.ru; Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russian Federation*

Keywords: abrasive; abrasive water-jet cutting; encapsulation; protective compound; fluidized bed.

Abstract: The paper presents the results of modeling the influence of abrasive particle physical properties on the air flow velocity required for fluidization during the application of a polymer protective compound intended for underwater abrasive water-jet cutting. Additionally, it presents the results of mathematical modeling regarding the acceleration of abrasive particles within the fluidized bed, based on the solution of derived equations of motion. An analysis is conducted of mathematical modeling methods applicable to describing the fluidization process of granular materials.

References

1. Sitek L., Martinec P. Abrasives and Possibilities of Increase in Efficiency of Abrasive Waterjets, *Science Journal*, 2016, vol. 3, pp. 877-881. doi: 10.17973/MMSJ.2016_03_201603

2. Barsukov G.V., Kozhus O.G., Vinokurov A.Yu. [Study of the Abrasive Capacity of Artificial and Natural Abrasives Ensuring Waterjet Cutting Performance], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 2(328), pp. 34-40. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting, In book: *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. ICIE 2018, 2019, pp. 267-276. doi: 10.1007/978-3-319-95630-5_29

4. Barsukov G.V., Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Kozhus O.G. [Life cycle of abrasive grain in a polymer shell during waterjet cutting], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2019, no. 6(338), pp. 72-79. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Kozhus O., Barsukov G., Shorkin V., Stepanov Yu. Obtaining the Dependences of the Contact of the Composite Abrasive Material with the Nozzle Walls, which Reduces the Wear of the Focusing Tube of the Waterjet Installation, *Materials Science Forum*, Krasnoyarsk, Russian Federation, 20–21 November 2020, 2021, vol. 1031, pp. 160-165. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.160

6. Ku Zilati Ku Zhaari, Pandey P., Song Y., Turton R. Monte Carlo simulations to determine coating uniformity in a Wurster fluidized bed coating process, *Powder Technology*, 2006, vol. 166, no. 2, pp. 81-90. doi: 10.1016/j.powtec.2006.05.001

7. Guo J., Liu D., Ma J., Liang C., Chen X. Particle circulation and coating in a Wurster fluidized bed under different geometries, *Powder Technology*, 2024, vol. 433, art. 119223. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119223

8. Li H., Liu D., Ma J., Chen X. Simulation of a Wurster fluidized bed by CFD-DEM with a cohesive contact model, *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 177, no. 1, pp. 157-166. doi: 10.1016/j.cherd.2021.10.038

9. Kozhus O., Barsukov G.V. The research of the Agglomeration Process During the Formation of an Abrasive-Polymer Compound for Waterjet Cutting in a Fluidized bed Installation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, pp. 2511-2518. doi: 10.1007/s00170-021-07140-0

10. Hemati M., Cherif R., Saleh K., Pont V. Fluidized Bed Coating and Granulation: Influence of Process-Related Variables and Physicochemical Properties on the Growth Kinetics, *Powder Technology*, 2003, vol. 130, no. 1-3, pp. 18-34. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00221-8

11. Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel Technique for Coating of Fine Particles Using Fluidized Bed and Aerosol Atomizer, *Processes*, 2020, vol. 8, no. 12, art. 1525. doi: 10.3390/pr8121525

12. Kartushinsky A.I., Rudi Yu.A., Tisler S.V., Khusainov M.T., Shcheglov I.N. [Network turbulence in a two-phase flow: influence of the parameters of the carrier medium and particles], *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Thermophysics], 2009, vol. 47, no. 2, pp. 292-298. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Seyedin S.H., Ardjmand M., Safekordil A.A., Raygan S. Experimental Investigation and CFD Simulation of Top Spray Fluidized Bed Coating System, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2017, vol. 61, no. 2, pp. 117-127.

14. Mitrofanov A.V., Ogurtsov A.V., Magnitsky V.A., Mizonov V.E., Tannous K. Mitrofanov, A.V. [Mathematical model of fluidization of a binary mixture of particles], *Vestnik IGEU* [Bulletin of IGEU], 2012, no. 1, pp. 45-47. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Ferziger J., Kaper G. *Matematicheskaya teoriya protsessov perenosa v gazakh* [Mathematical theory of transport processes in gases], Moscow: Mir, 1976, 554 p. (In Russ.)

Simulation der Anwendungsmodi der Polymerschutzverbindung auf Schleifmittel in einem Fluidbett für das Unterwasser-Wasserstrahlschneiden

Zusammenfassung: Dieser Artikel präsentiert die Ergebnisse der Modellierung des Einflusses der physikalischen Eigenschaften von Abrasivpartikeln auf die Luftströmungsgeschwindigkeit, um deren Fluidisierung für die Anwendung des Polymerverbundschutzes beim Unterwasser-Wasserstrahlschneiden zu gewährleisten. Weiterhin sind die Ergebnisse der mathematischen Modellierung des Beschleunigungsprozesses der Abrasivpartikel in einem Wirbelschichtbett auf Basis der Lösung der ermittelten Bewegungsgleichungen vorgestellt. Abschließend erfolgt die Analyse mathematischer Modellierungsmethoden zur Beschreibung des Fluidisierungsprozesses von Schüttgütern.

Modelisation des régimes d'application d'un compound-protecteur polymérique sur l'abrasif dans une couche bouillante pour la coupe hydroabrasive sous-marine

Résumé: Sont présentés les résultats dela modélisation de l'influence des propriétés physiques des particules abrasives sur la vitesse du flux d'air assurant leur fluidisation pour l'application d'un protecteur polymère en couche sous-marine par découpe hydroabrasive, ainsi que les résultats de la modélisation mathématique du processus d'accélération des particules abrasives dans la couche fluidisée basés sur la résolution des équations de mouvement obtenues. Est effectuée une analyse des méthodes de la modélisation mathématique applicables à la description du processus de la fluidisation des matières granulaires.

Авторы: ***Барсуков Геннадий Валерьевич*** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Фроленков Константин Юрьевич*** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Фетисов Александр Сергеевич*** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Власов Виктор Викторович*** – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Петрухин Антон Владимирович*** – стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», Орел, Российская Федерация.

УДК 66.02
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.516-524

БЛОК ХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА

© Р. В. Дорохов[1] ✉, Ю. А. Ферапонтов[1], М. Ю. Плотников[1]

[1] *АО «Росхимзащита», ohinht@krhz.ru; Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: время защитного действия; надпероксид калия; регенеративный патрон; регенеративный продукт; системы жизнеобеспечения.

Аннотация: Разработаны опытные образцы блока химической регенерации воздуха для систем коллективной защиты от поражающих факторов химической природы и проведены их испытания. Использование нового регенеративного продукта и пленки из фторопласта Ф-4МБ в качестве конструкционного материала позволило снизить в 2-3 раза массогабаритные характеристики изделия по сравнению с существующими аппаратами.

Введение

В современных условиях при техногенных авариях с выбросом химических веществ, неблагоприятно воздействующих на организм человека, одной из основных причин смерти является отравление диоксидом углерода или газами, выделяющимися при горении различных материалов [1]. В условиях, когда невозможно или нецелесообразно использование средств индивидуальной защиты, применяются системы коллективной защиты, рассчитанные на обеспечение безопасности значительного количества людей. Данные системы предназначены для восстановления состава воздуха по кислороду и диоксиду углерода в закрытых помещениях за счет химической регенерации воздуха. Эти средства могут быть разделены на две группы, принципиально отличающиеся друг от друга: системы с применением сжатого кислорода и системы с использованием кислорода, получаемого при протекании химических реакций [2 – 17].

В системах жизнеобеспечения (**СЖО**) на сжатом кислороде процесс обогащения воздуха осуществляется с использованием баллонов, а удаление диоксида углерода – с помощью поглотителей, в качестве которых могут быть использованы твердые сорбенты (молекулярные сита и активированный уголь), гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов, жидкие амины и др.

Системы второй группы могут быть разделены по методу получения кислорода: с использованием твердых источников кислорода на основе хлоратов и перхлоратов щелочных металлов [5 – 7] и с использованием регенеративных продуктов (**РП**) на основе перекисных соединений щелочных металлов и щелочноземельных металлов. По таким важным для регенеративных продуктов свойствам, как стехиометрическая емкость по диоксиду углерода и кислороду, стабильность при температурах, близких к температуре окружающей среды, в ряду перекисных соединений предпочтительное положение занимают надпероксиды натрия и калия. Использование данных химических соединений позволяет минимизировать массогабаритные параметры изделий [8, 9].

Основной задачей при разработке системы химической регенерации воздуха для коллективных средств защиты является поддержание в закрытом помещении

требуемых концентраций кислорода и диоксида углерода. Это решается путем создания оптимальных условий работы регенеративного продукта, обеспечивающих его эффективное использование. При этом, как и для индивидуальных средств защиты органов дыхания человека, в коллективных средствах защиты более полная отработка регенеративного продукта достигается за счет улучшения условий взаимодействия регенерируемого воздуха с РП.

Выпускаемые на сегодняшний день коллективные средства защиты на основе регенеративных продуктов как отечественного, так и зарубежного производства обладают рядом недостатков, среди которых – спекание гранул регенеративного продукта (что ухудшает регенерацию воздуха), повышенные массогабаритные характеристики. Кроме этого, необходимо реализовать различные режимы работы устройств в условиях наличия и отсутствия электроэнергии (при отключении электроэнергии необходима установка ручного пневмонасоса, отключение и демонтаж вентилятора, что усложняет работу изделия).

Для преодоления указанных недостатков предпринята попытка создания блока регенерации воздуха на основе регенеративного продукта РПК-П [8, 10 – 12, 14, 15] с использованием полимерных материалов, который отличался бы автономностью работы с одновременным упрощением эксплуатации устройства за счет замены рабочих и аварийного режимов работы одним универсальным. Одновременно решалась задача повышения комфортности дыхания за счет снижения возможности «закислороживания» регенерируемой атмосферы в закрытом помещении и удобства применения путем уменьшения массогабаритных характеристик устройства. Последнее особенно актуально для коллективных систем жизнеобеспечения в условиях ограниченного объема (например, кабины космических кораблей, аппаратов для глубоководных погружений и др.).

Экспериментальная часть

Для устранения указанных выше недостатков разработан блок химической регенерации воздуха (**БХРВ**), предназначенный для создания и поддержания пригодной для дыхания атмосферы в герметичных объектах коллективной защиты, отвечающий ряду требований:

– время приведения БХРВ в действие должно быть не более 5 мин;

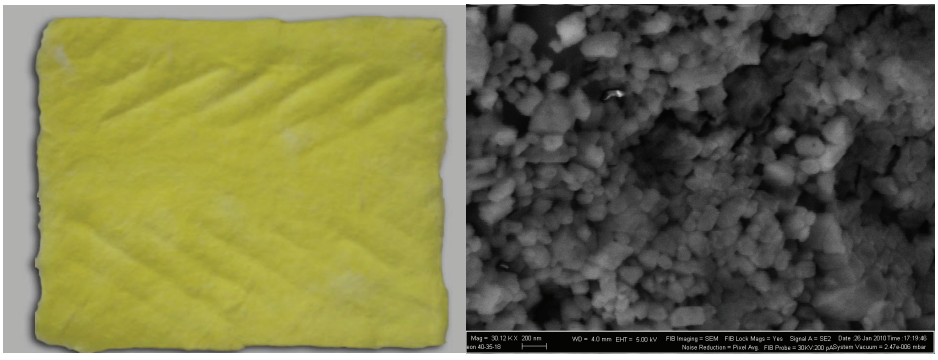
– в процессе работы не должно быть выделения токсичных веществ;

– масса блока должна быть не более 4,5 кг.

В качестве регенеративного продукта в БХРВ использовался регенеративный продукт РПК-П, получаемый по технологии, представленной в работах [8, 10 – 12, 14, 15]. РПК-П представляет собой пластину, в которой наноразмерные кристаллы надпероксида калия «закреплены» на поверхности и в порах пористой матрицы из стекловолокна таким образом, что продукт имеет максимально развернутую поверхность, доступную (практически к каждому кристаллу надпероксида калия) к взаимодействию с парами воды и диоксидом углерода (рис. 1).

Использование данного РП позволяет полностью устранить эффект слипания гранул и обеспечить кинетику взаимодействия с водяным паром и диоксидом углерода, позволяющую проводить регенерацию воздуха в частично конвективном режиме. При использовании продукта РПК-П в БХРВ степень его отработки по CO_2 и кислороду достигает почти 95 % от стехиометрии.

Также были предприняты попытки кардинального изменения конструкции изделия и использования материалов, стойких к повышенным температурам и химически инертных к регенеративному продукту. В качестве таких материалов применены фторопластовая пленка Ф-4 МБ толщиной 50 мкм и полипропилен, что позволило отказаться от применения в изделии металла как конструкционного материала и привело к снижению массогабаритных характеристик.



а) *б*)



в)

Рис. 1. Регенеративный продукт РПК:
а – внешний вид пластины регенеративного продукта; *б* – общий вид платины регенеративного продукта под электронным сканирующим микроскопом (ЭСМ); *в* – нанокристаллы надпероксида калия на стекловолокне (съемка ЭСМ)

Блок химической регенерации воздуха предназначен для создания и поддержания объемной доли кислорода от 19 до 23 %, объемной доли диоксида углерода не более 1 % в герметичных объектах коллективной защиты. Время защитного действия составляет 5 ч при условиях в герметичном объекте:

– температура воздуха (20 ± 5) ^{o}C;
– относительная влажность воздуха (85 ± 10) %;
– потребление кислорода 28 дм^3/ч в расчете на одного человека;
– выделение диоксида углерода в количестве 25 дм^3/ч на одного человека;
– свободный объем не менее 6 м^3 на одного человека;
– количество людей, защищаемых одним БХРВ – 4 человека.

Схематичное изображение БХРВ приведено на рис. 2. Блок химической регенерации воздуха содержит оболочку *1*, силовые ленты *2*, пластины регенеративные *3*, элементы крепления *4* и узел стыковочный *5*. Оболочка представляет собой патрон, выполненный из фторопластовой пленки Ф-4 МБ и разделенный посредством сварного шва П-образной формы на два рукава. Внутри каждого рукава с помощью элементов крепления, соединенных с оболочкой, установлены силовые ленты, которые выполнены из фторопластовой пленки Ф-4 МБ и поперечными сварными швами разделены на ячейки, где установлены пластины регенеративные. Силовые ленты попарно в верхней части закреплены на полипропиленовых пластинах, имеющих отверстия для закрепления на гибких элементах между фиксаторами. Элемент крепления содержит боковые пластины с гнездами для крепления блока регенерации на стойке. Боковые пластины соединены между собой гибкими элементами, содержащими фиксаторы рабочего положения для дистанционирования регенеративных пластин. В нижней части патрона установлен узел стыковочный для соединения блока регенерации с побудителем расхода воздуха.

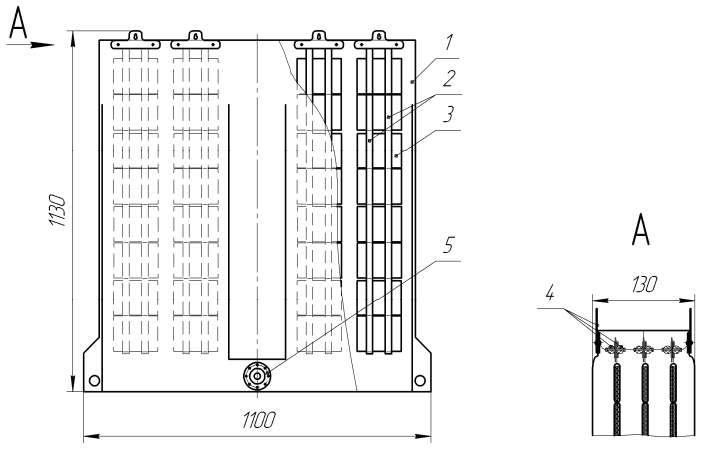


Рис. 2. Схема блока химической регенерации воздуха



а) *б*)

Рис. 3. Блок химической регенерации воздуха:
а – размещение на стойке; *б* – упаковка

Блок химической регенерации воздуха отвечает принципу модульности, то есть на стойке с вентилятором размещается блок регенерации, который после отработки заменяется новым (рис. 3). В качестве побудителя расхода регенерируемого воздуха через БХРВ выступает вентилятор, который может быть как электрическим, так и механическим, подключаемый к БХРВ через узел стыковки, позволяющий использовать различные типы вентиляторов при условии создания требуемого расхода. Блок регенерации обладает рядом преимуществ в отношении применяемых в настоящее время средств регенерации воздуха:

– меньшие массогабаритные характеристики;

– мобильность блока: возможно развертывание в рабочее положение в любом свободном месте при наличии электрической сети;

– малое время приведения в рабочее положение;

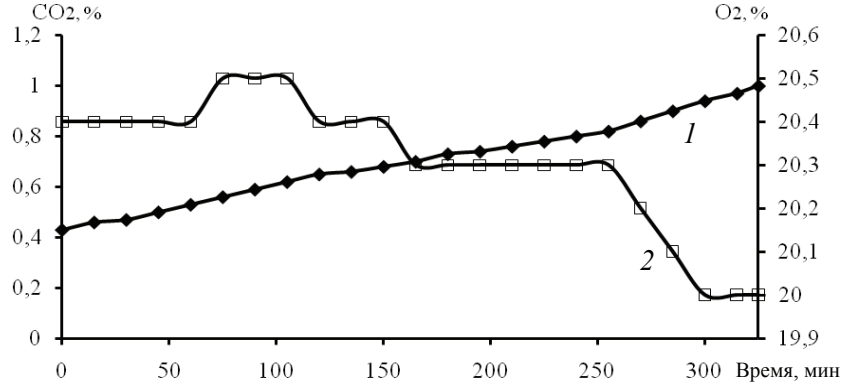
– простота обслуживания: не требуются дополнительные навыки персонала или укрываемых людей;

– использование электрических сетей общего назначения.

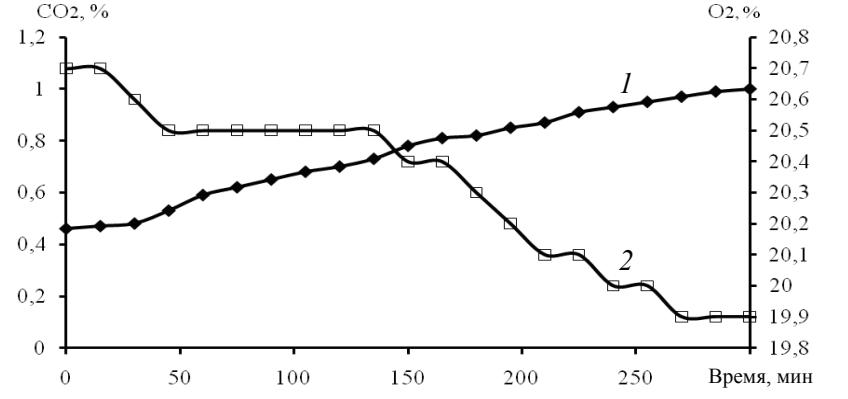
Таблица 1

Условия испытаний блока химической регенерации воздуха

Параметр	Номер опыта	
	1	2
Начальная концентрация CO_2, %	0,4	
Объемный расход, $дм^3/ч$:		
кислорода O_2	112	
диоксида углерода CO_2	100	
Принудительная вентиляция, $м^3/ч$	20	
Температура, °С	20 ± 1	6 ± 1
Влажность, %	85 ± 10	
Объем камеры, $дм^3$	24000	
Масса регенеративного продукта, кг	3650,56	3628,28
Время защитного действия, ч	5	
Количество укрываемых людей, чел.	4	



а)



б)

Рис. 4. Зависимости концентрации диоксида углерода (*1*) и кислорода (*2*) от времени:
а – опыт № 1, *б* – опыт № 2

Объектами, где возможно применение блока химической регенерации воздуха, являются:

– герметичные убежища гражданской обороны;

– пункты управления;

– убежища, находящиеся в частном владении;

– герметичные отсеки транспортных средств.

Испытания блока химической регенерации проводили при различных температурно-влажностных режимах. Условия испытаний приведены в табл. 1. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

Заключение

На основании экспериментальных данных сделан вывод, что блок химической регенерации воздуха на основе регенеративного продукта РПК-П с использованием полимерных материалов обладает следующими преимуществами:

– использование в качестве конструкционного материала пленки из фторопласта Ф-4МБ в 2-3 раза позволило снизить массогабаритные характеристики изделия по сравнению с существующими аппаратами, повысив при этом удобство при хранении БХРВ;

– равномерная отработка регенеративного продукта препятствует увеличению концентрации кислорода в помещении выше допустимых значений, что обеспечивает комфортность дыхания, одновременно повышая безопасность применения изделия;

– постоянная готовность к использованию;

– не требует эксплуатационных затрат на проверку в процессе хранения.

Список литературы

1. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году : Государственный доклад / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – Москва, 2025. – 272 с. – URL : https://mchs.gov.ru/dokumenty/7807 (дата обращения: 07.09.2026).

2. Ракетно-космическая корпорация Энергия имени С. П. Королева в первом десятилетии XXI века 2001–2011 гг. Том 3 : 2001–2011// В. А. Лопота (гл.ред.). – Москва : РКК «Энергия», 2011. – 832 с.

3. Аврущенко, Н. Н. Системы электрохимической регенерации воздуха атомных подводных лодок / Н. Н. Аврущенко, А. Ф. Новиков, В. И. Френкель. – Москва : Русская история, 2002. – 430 с.

4. Petrocelli, A. Some Notes on the Use of Superoxides in Regenerative Air System / A. Petrocelli, A. Capolesto // Aerospace Medicine. – 1964. – Vol. 31. – P. 440–446.

5. Патент № 2012150478 Российская Федерация, МПК A62B 11/00. Система регенерации воздуха : № 2012150478/12 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 10.06.2014 / Копытов Ю. Ф., Гудков С. В., Путин С. Б. ; заявитель и патентообладатель ОАО Корпорация «Росхимзащита», бюл. № 16. – 1 с.

6. Патент № 2006116139 Российская Федерация, МПК C01B 13/02. Генератор кислорода : № 2006116139/15 ; заявл. 10.05.2006 ; опубл. 10.12.2007 / Симаненков С. И., Копытов Ю. Ф., Булаев Н. А., Попов В. А., Скворцов А. Ф. ; заявитель и патентообладатель ОАО Корпорация «Росхимзащита». – 1 с.

7. Патент № 2837705 Российская Федерация, МПК A62D 9/00. Состав пускового брикета для изолирующего дыхательного аппарата : № 2024110206 ; заявл. 12.04.2024 ; опубл. 03.04.2025 / Ферапонтова Л. Л., Булаев Н. А., Ферапон-

тов Ю. А., Милосердов А. В. ; патентообладатель АО «Росхимзащита», бюл. № 10. – 9 с.

8. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратурное оформление / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий [и др.]. – Москва : Машиностроение-1, 2007. – 156 с.

9. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учебное пособие / С. В. Гудков, С. И. Дворецкий, С. Б. Путин, В. П. Таров. – Москва : Машиностроение, 2008. – 188 с.

10. Кинетика взаимодействия надпероксида калия с диоксидом углерода / Р. В. Дорохов, Н. Ф. Гладышев, С. Б. Путин [и др.] // Химическая физика. – 2007. – Т. 26, № 10. –С. 81–84.

11. Интенсификация процесса получения регенеративного продукта на матрице в вакууме. / Р. В. Дорохов, Н. Ф. Гладышев, С. Б. Путин [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4-1. – С. 1057–1064.

12. Ферапонтов, Ю. А. Аппаратурно-технологическое оформление процесса дегидратации тройной системы КОН – H_2O_2 – H_2O для получения регенеративного продукта / Ю. А. Ферапонтов, Р. В. Дорохов, Р. В. Нефедов // Химическая промышленность сегодня. – 2016. – № 12. – С. 13–20.

13. Продукты для химической регенерации воздуха в системах жизнеобеспечения человека на основе керамических высокопористых блочно-ячеистых материалов / Ю. А. Ферапонтов, Р. В. Дорохов, И. В. Захаров [и др.]. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2021. – № 3-4. – С. 14–20.

14. Патент № 2599664 Российская Федерация, МПК A62D 9/00. Способ получения структурированного регенеративного продукта : № 2015120319/05 ; заявл. 28.05.2015 ; опубл. 10.10.2016 / Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю. ; патентообладатель ОАО Корпорация «Росхимзащита», бюл. № 28. – 11 с.

15. Патент № 2703878 Российская Федерация, МПК A62D 9/00. Способ получения продукта для регенерации воздуха : № 2019108515 ; заявл. 25.03.2019 ; опубл. 22.10.2019 / Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю., Тарова А. А. ; патентообладатель АО Корпорация «Росхимзащита», бюл. № 30. – 10 с.

16. Патент № 2712695 Российская Федерация, МПК B01J 20/32; B01J 20/06; B29C 53/24. Способ изготовления блочного регенеративного продукта : № 2019100830 ; завял. 10.01.2019 ; опубл. 30.01.2020 / Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю., Еськов В. А., Рязанов И. В. ; патентообладатель АО Корпорация «Росхимзащита», бюл. № 4. – 15 с.

17. Патент № 2765943 Российская Федерация, МПК C04B 38/00; A62D 9/00. Способ получения керамических высокопористых блочно-ячеистых регенеративных материалов : № 2021133371 ; заявл. 17.11.2021 ; опубл. 07.02.2022 / Грунский В. Н., Гаспарян М. Д., Захаров И. В., Ферапонтов Ю. А., Дорохов Р. В, Комарова А. Д. ; патентообладатель РХТУ им. Д. И. Менделеева, бюл. № 4. – 9 с

Chemical Air Regeneration Unit

© R. V. Dorokhov[1] ✉, Yu. A. Ferapontov[1], M. Yu. Plotnikov[1]

[1] *JSC Roskhimzashchita, ohinht@krhz.ru; Tambov, Russian Federation*

Keywords: protection time; potassium superoxide; regenerative cartridge; regenerative product; life support systems.

Abstract: Prototype chemical air regeneration units for collective protection systems against chemical hazards have been developed and tested. The use of a new regenerative product and F-4MB fluoroplastic film as a structural material made it possible to reduce the unit's mass and dimensions by a factor of 2-3 compared to existing devices.

References

1.Available at: https://mchs.gov.ru/dokumenty/7807 (accessed 07 September 2026).

2. Lopota V.A. (Ed.) *Raketno-kosmicheskaya korporatsiya Energiya imeni S.P. Koroleva v pervom desyatiletii XXI veka 2001–2011 gg. Vol. 3: 2001–2011* [S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia in the First Decade of the 21st Century (2001-2011). Vol. 3: 2001–2011], Moscow: Energiya, 2011, 832 p. (In Russ.)

3. Avrushchenko N.N., Novikov A.F., Frenkel'V.I. *Sistemy elektrokhimicheskoy regeneratsii vozdukha atomnykh podvodnykh lodok* [Electrochemical Air Regeneration Systems for Nuclear Submarines], Moscow: Russkaya istoriya, 2002, 430 p. (In Russ.)

4. Petrocelli A., Capolesto A. Some Notes on the Use of Superoxides in Regenerative Air System, *Aerospace Medicine*, 1964, vol. 31, pp. 440-446.

5. Kopytov Yu.F., Gudkov S.V., Putin S.B. *Sistema regeneratsii vozdukha* [Air Regeneration System], Russian Federation, 2014, Pat. 2012150478 (In Russ.)

6. Simanenkov S.I., Kopytov Yu.F., Bulayev N.A., Popov V.A., Skvortsov A.F. *Generator kisloroda* [Oxygen generator], Russian Federation, 2007, Pat. 2006116139 (In Russ.)

7. Ferapontova L.L., Bulayev N.A., Ferapontov Yu.A., Miloserdov A.V. *Sostav puskovogo briketa dlya izoliruyushchego dykhatel'nogo apparata* [Composition of a starter briquette for an isolating breathing apparatus], Russian Federation, 2025, Pat. 2837705 (In Russ.)

8. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretskiy S.I. [et al.], *Regenerativnyye produkty novogo pokoleniya: tekhnologiya i apparaturnoye oformleniye* [New-generation regenerative products: technology and equipment design], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2007, 156 p. (In Russ.)

9. Gudkov S.V., Dvoretskiy S.I., Putin S.B., Tarov V.P. *Izoliruyushchiye dykhatel'nyye apparaty i osnovy ikh proyektirovaniya: uchebnoye posobiye* [Self-contained breathing apparatus and principles of their design: a textbook], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 188 p. (In Russ.)

10. Dorokhov R.V., Gladyshev N.F., Putin S.B. [et al.], [Kinetics of the interaction between potassium superoxide and carbon dioxide], *Khimicheskaya fizika* [Chemical Physics], 2007, vol. 26, no. 10, pp. 81-84. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Dorokhov R.V., Gladyshev N.F., Putin S.B. [et al.], [Intensification of the process for producing a regenerative product on a matrix under vacuum], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 4-1, pp. 1057-1064. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Ferapontov Yu.A., Dorokhov R.V., Nefedov R.V. [Equipment and process design for the dehydration of the KOH – H_2O_2 – H_2O ternary system to produce a regenerative product], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical Industry Today], 2016, no. 12, pp. 13-20. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Ferapontov Yu.A., Dorokhov R.V., Zakharov I.V. [et al.], [Products for chemical air regeneration in human life-support systems based on highly porous ceramic block-cellular materials], *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2021, no. 3-4, pp. 14-20. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Dorokhov R.V., Ferapontov Yu.A., Plotnikov M.Yu. *Sposob polucheniya strukturirovannogo regenerativnogo produkta* [Method for producing a structured regenerative product], Russian Federation, 2016, Pat. 2599664 (In Russ.)

15. Dorokhov R.V., Ferapontov Yu.A., Plotnikov M.Yu., Tarova A.A. *Sposob polucheniya produkta dlya regeneratsii vozdukha* [Method for producing a product for air regeneration], Russian Federation, 2019, Pat. 2703878 (In Russ.)

16. Dorokhov R.V., Ferapontov Yu.A., Plotnikov M.Yu., Yes'kov V.A., Ryazanov I.V. *Sposob izgotovleniya blochnogo regenerativnogo produkta* [Method for manufacturing a block-type regenerative product], Russian Federation, 2020, Pat. 2712695 (In Russ.)

17. Grunskiy V.N., Gasparyan M.D., Zakharov I.V., Ferapontov Yu.A., Dorokhov R.V, Komarova A.D. *Sposob polucheniya keramicheskikh vysokoporistykh blochno-yacheistykh regenerativnykh materialov* [Method for producing highly porous ceramic block-cellular regenerative materials], Russian Federation, 2022, Pat. 2765943 (In Russ.)

Chemische Luftregenerierungsanlage

Zusammenfassung: Es sind Prototypen einer chemischen Luftregenerationseinheit für kollektive Schutzsysteme gegen chemische Gefahren entwickelt und getestet. Die Verwendung des neuen regenerativen Produkts und der Folie aus Fluorkunststoff F 4MB als Konstruktionsmaterial hat es ermöglicht, die Abmessungen des Produkts im Vergleich zu bestehenden Geräten um das 2-3-fache zu reduzieren.

Bloc de régeneration chimique de l'air

Résumé: Sont développés et testés des prototypes du bloc de la régénération chimique de l'air pour les systèmes de la protection collective contre les facteurs nocifs de la nature chimique. L'utilisation d'un nouveau produit régénérateur et d'un film en fluoroplaste F-4MB comme matériau de construction a permis de réduire de 2 à 3 fois les caractéristiques de masse et de dimensions du produit par rapport aux appareils existants.

Авторы: ***Дорохов Роман Викторович*** – кандидат технических наук, начальник лаборатории № 2; ***Ферапонтов Юрий Анатольевич*** – кандидат технических наук, начальник отдела химии и новых химических технологий; ***Плотников Михаил Юрьевич*** – заместитель начальника отдела внедрения химических технологий, АО «Росхимзащита», Тамбов, Российская Федерация.

УДК 534-8
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.525-530

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЗЛА МЕЛЮЩЕГО АППАРАТА ПОГРУЖНОГО ТИПА

© В. А. Тихомиров[1], А. В. Ермолов[1], А. Б. Капранова[1] ✉

[1] *Кафедра «Теоретическая и прикладная механика», kapranova_anna@mail.ru; ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация*

Ключевые слова: бисер; корзина; мельница; параметрическая модель; разгонный элемент.

Аннотация: Проектирование физической модели разгонного элемента, как узла мелющего аппарата для диспергирования твердого осадка, выполнено с помощью параметрического моделирования. Исследование позволило установить факторы влияния из набора конструктивных параметров мельницы с погружной корзиной на технологический процесс с совмещением измельчения твердого осадка и смешения составляющих лакокрасочного продукта. Проектирование мелющего оборудования указанного типа способствует выявлению особенностей протекания данной технологической операции на примере его визуализации.

Введение

Разработка методик расчета аппаратов для диспергирования является актуальной проблемой развития лакокрасочной промышленности. Процесс диспергирования в бисерных мельницах погружного типа заключается в измельчении твердых включений с помощью бисера и перемешивании измельченных компонентов для получения суспензий [1].

При этом проектирование специального оборудование сопряжено с рядом затруднений различного характера, в том числе с оценкой параметров совмещенных процессов, влиянием физико-химических свойств рабочих материалов и т.п. Например, цветовая гамма лаков и красок, получаемых при диспергировании компонентов-пигментов, существенным образом может зависеть от площади контактных металлических поверхностей внутри рабочего объема мельницы.

Создание физической модели лабораторной установки на основе 3D-модели способствует не только визуализации совмещенных технологических процессов измельчения твердых осадков смешения компонентов в жидкой среде для получения конечного лакокрасочного продукта, демонстрации работы мелющего устройства, но и проведению реальных экспериментальных исследований со сменными элементами мелющего оборудования. Авторами предложена конструкция погружной корзины данного мелющего аппарата [2], проектирование которой требует выбора рациональных интервалов изменения конструктивных параметров с учетом целевого назначения данного устройства.

Цель работы – разработка параметрической модели узла мелющего аппарата погружного типа для создания физической модели соответствующих элементов лабораторного оборудования на основе конструктивного решения [2].

Результаты параметрической модели узла мелющего аппарата

Конкретизируем результаты параметрического проектирования узла мелющего аппарата. Уточним элементы условной классификации конструкций мелющих аппаратов [1], согласно которой различают два типа мельниц – механические и электромагнитные. Конструктивные особенности данных устройств для диспергирования твердых осадков в жидкости зависят от конкретного назначения оборудования и отличаются, как правило, типами сепаратора, ротора и ориентацией в пространстве рабочей зоны (вертикальной или горизонтальной). В настоящей работе внимание уделено проектированию аппарата погружного типа.

Согласно сформулированной цели работы определим две основные задачи, необходимые для решения: выявление особенностей перспективного направления проектирования (для достижения равномерного разбрасывания мелющего бисера по рабочей зоне с замкнутым движением жидкой среды и т.п.) и значимых факторов эффективности процесса диспергирования твердого осадка.

Учитывая выявленные ранее направления совершенствования конструкции мельницы погружного типа [1] и опыт прототипирования элементов аппарата [3], обратимся к параметрическому моделированию объекта – узла мелющего аппарата [2] (рис. 1 и 2).

Совмещенные технологические процессы измельчения и смешения реализуются при ударном взаимодействии с бисером различной конфигурации [4], чаще всего – шарами, предпочтительно стеклянными, циркониевыми или керамическими, то есть материалами с заданными показателями твердости, истираемости, химической нейтральности, ударно-вязкими свойствами и т.п. [5].

Кратко остановимся на особенностях схемы проектируемого узла мелющего аппарата (см. рис. 1). Движение бисера *5* в рабочей зоне мельницы [2] внутри размольной камеры *1* (с вертикальным валом *2* и закрепленными на нем лопатками *6* при наличии перфорацией на боковых поверхностях стенки) происходит за счет вращения разгонных элементов/ротора *3*, напротив которых имеется фиксация кольцевого разделителя *4* на внутренней части отсека камеры *1*.

Параметрическому проектированию узла мелющего аппарата предшествует выявление его значимых конструктивных параметров.

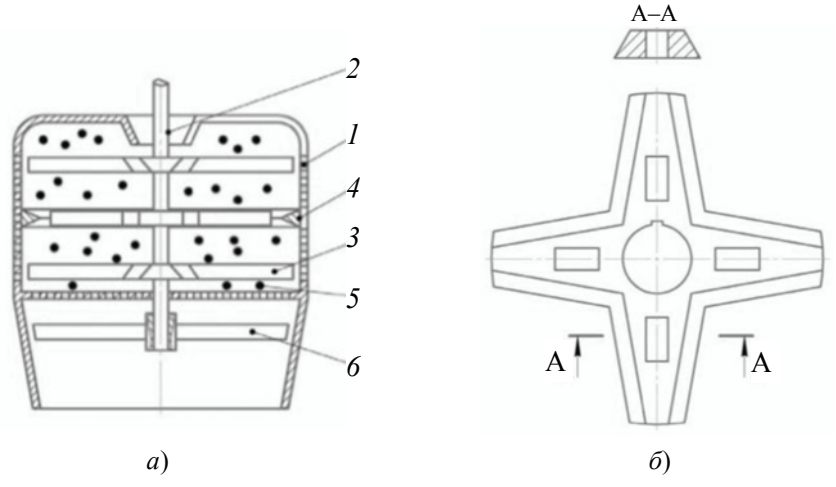


Рис. 1. Схема узла мелющего аппарата [2]:
а – корзина аппарата; *б* – конфигурация разгонных элементов

В таблице 1 приведены сведения о глобальных переменных имитационной модели (см. рис. 2) для узла мелющего аппарата (см. рис. 1) для создания лабораторного прототипа, как физической модели. Входными параметрами параметрического проектирования служат: V – требуемый объем корзины, P – мощность, N – частота вращения привода и др.

Расчет значений конструктивных характеристик корзины мелющего аппарата [2] выполняется в системе КОМПАС 3Д [6, 7] в рамках приведенных ограничений, представленных в табл. 1, в том числе допускаемых напряжений при кручении, предельных значений высоты корзины, диаметра ее рабочей области, высоты рабочей части ротора, диаметра вала. При этом значения некоторых конструктивных параметров зафиксированы: угол между пальцами ротора, количество рядов этих пальцев и т.п.

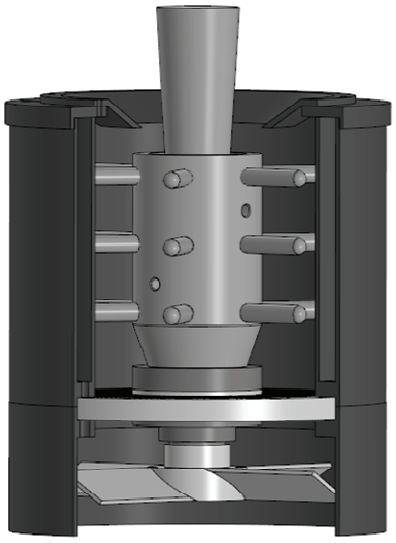


Рис. 2. Схема роторной корзины бисерной мельницы погружного типа

Таблица 1

Параметры моделирования роторной корзины бисерной мельницы погружного типа

Глобальные переменные	Обозначение/уравнение	Значение
Мощность двигателя, кВт	P	3
Частота вращения двигателя, мин$^{-1}$	N	3000
Крутящий момент двигателя, Н·м	$M = 9555P/N$	9,55
Допускаемое напряжение при кручении, МПа	$[\tau_{кр}]$	30
Объем корзины, м^3	V	0,004
Высота корзины, мм	$h \geq 1{,}25D$	200
Диаметр рабочей области корзины, мм	$D = \text{int}\sqrt[2]{\frac{4v}{h\pi}}$	160
Наружный диаметр корзины, мм	$D_1 = 1{,}5D$	240
Диаметр вала, мм	$d = \sqrt[3]{\frac{16M}{\pi[\tau_{кр}]}}$	35
Диаметр втулки ротора, мм	d_1	60
Длина рабочей части пальца ротора, мм	$l = (0{,}8d - d_2)/2$	34
Диаметр пальца ротора, мм	$d_2 \geq 0{,}2d$	8
Высота рабочей части ротора, мм	$h_1 = 1{,}5d_1$	90
Угол между пальцами, °	a	60
Число рядов пальцев ротора	n	3
Высота между рядами пальцев ротора, мм	$h_2 = h_1/n$	30

Заключение

Таким образом, сформирована имитационная модель нового узла мелющего аппарата [2] при ограничениях на входные параметры технологического процесса с перспективой разработки физической модели соответствующих элементов лабораторного оборудования специального назначения. В частности, данная модель актуальна для визуализации совмещенных технологических процессов измельчения твердых осадков смешения компонентов в жидкой среде для получения конечного лакокрасочного продукта и демонстрации работы мелющего устройства [8, 9].

Список литературы

1. Ермолов, А. В. Анализ разновидностей современного диспергирующего оборудования / А. В. Ермолов, С. Л. Мазуровский, А. Б. Капранова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 6(52). – С. 116–124. doi: 10.25699/SSSB.2023.52.6.015

2. Патент № 2836345 C1 Российская Федерация, МПК B02C 17/00 (2006.01). Корзина погружной бисерной мельницы : № 2024126920 : заявл. 12.09.2024 : опубл. 13.03.2025 / Ермолов А. В., Мазуровский С. Л., Капранова А. Б. ; заявитель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – Бюл. № 8. – 5 с.

3. Совершенствование процесса диспергирования твердого осадка в бисерной мельнице погружного типа с элементами прототипирования конструкции / В. А. Тихомиров, А. В. Ермолов, Д. Д. Бахаева, А. Б. Капранова // ПАХТ-2025 : Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского, Москва, 10–11 апреля 2025 г. – Москва, 2025. – С. 250–254.

4. Cherje, T. W. Relationship between microsructure, hardness, Impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations / T. W. Cherje, D. J. Simbi, E. Navara // Materials and Design. – 2004. – Vol. 25, No. 1. – P. 11–18. doi: 10.1016 /S0261-3069(03)00168-7

5. Matsanga, N. Grinding Media in Ball Mills-A Review / N. Matsanga, W. Nheta, N. Chimwani // Posted: 24 April 2023. doi: 10.20944/preprints202304.0811.v1. – URL : https://www.resear chgate.net/publication/370233290_Grinding _Media_in_ Ball_Mills-A_Review (дата обращения: 13.05.2026).

6. Баянов, Е. В. Моделирование в системе КОМПАС-3Д. Базовый уровень : учебное пособие / Е. В. Баянов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 88 с.

7. Ганков, М. С. Обзор свободно распространяемых программ для параметрического моделирования элементов энергетических установок / М. С. Ганков, В. Ю. Ильичев // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : Региональная научно-техническая конференция, Калуга, 19–20 апреля 2022 г. – Москва, 2022. – Том 1. – С. 138–140.

8. Тихомиров, В. А. Параметрическое проектирование узла мелющего аппарата погружного типа / В. А. Тихомиров, А. В. Ермолов, А. Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике. – 2025. – № 12-13. – С. 77–80.

9. Тихомиров, В. А. Параметрическая модель пальчикового ротора бисерной мельницы / В. А. Тихомиров, А. В. Ермолов, А. Б. Капранова // Технологии, дизайн, искусство – традиции и инновации : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, приуроченной к 105-летию РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, 13 мая 2026 г. – Москва, 2026. – Часть 3. – С. 118–123.

Parametric Model of a Submersible Grinding Machine Unit

© V. A. Tikhomirov[1], A. V. Ermolov[1], A. B. Kapranova[1] ✉

[1] *Department of Theoretical and Applied Mechanics, kapranova_anna@mail.ru; Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation*

Keywords: beads; basket; mill; parametric model; accelerating element.

Abstract: The design of the physical model of the accelerating element as a unit of the grinding apparatus for dispersing solid sediment was carried out using parametric modeling. The study made it possible to establish the influence factors from a set of design parameters of a mill with a submersible basket on the technological process combining grinding of solid sediment and mixing the components of a paint and varnish product. The design of grinding equipment of this type helps to identify the peculiarities of a given technological operation using the example of its visualization.

References

1. Ermolov A.V., Mazurovsky S.L., Kapranova A.B. [Analysis of Types of Modern Dispersing Equipment], *South Siberian Scientific Bulletin*, 2023, no 6(52), pp. 116-124. doi: 10.25699/SSSB.2023.52.6.015 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Ermolov A.V., Mazurovsky S.L., Kapranova A.B. *Korzina pogruzhnoy bisernoy mel'nitsy* [Submersible bead mill basket], Russian Federation, 2025, Pat. 2836345 C1 (In Russ.)

3. Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Bakhaeva D.D., Kapranova A.B. [Improving the process of solid sediment dispersion in a submersible bead mill with design prototyping elements], *PAKHT-2025: Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy seminar, posvyashchennyy 100-letiyu so dnya rozhdeniya Yu.I. Dytnerskogo, Moskva, 10-11 April 2025* [PAHT-2025: International scientific and practical seminar dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu. I. Dytnersky, Moscow, April 10-11, 2025], Moscow, 2025, pp. 250-254. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Cherje T.W., Simbi D.J., Navara E. Relationship between microsructure, hardness, Impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations, *Materials and Design*, 2004, vol. 25, no 1, pp. 11-18. doi: 10.1016 /S0261-3069(03)00168-7

5. available at: https://www.resear chgate.net/publication/370233290_Grinding_ Media_in_Ball_Mills-A_Review (accessed 13 May 2026).

6. Bayanov Ye.V. *Modelirovaniye v sisteme KOMPAS-3D. Bazovyy uroven': uchebnoye posobiye* [Modeling in the KOMPAS-3D system. Basic level: a tutorial], Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2020, 88 p. (In Russ.)

7. Gankov M.S. *Naukoyemkiye tekhnologii v priboro- i mashinostroyenii i razvitiye innovatsionnoy deyatel'nosti v vuze: Ryegional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [High-tech technologies in instrument-making and mechanical engineering and development of innovative activities in universities: Regional scientific and technical conference], Kaluga, April 19-20, 2022, Moscow, 2022, vol. 1, pp. 138-140. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Kapranova A.B. *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2025, no 12-13, pp. 77-80. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Kapranova A.B. *Tekhnologii, dizayn, iskusstvo – traditsii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarod-noy nauchno-*

prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 105-letiyu RGU im. A.N. Kosygina [Technologies, design, art - traditions and innovations: Collection of scientific papers of the International scientific and practical conference dedicated to the 105th anniversary of the A.N. Kosygin Russian State University, Moscow, May 13, 2026), 2026, Part 3, pp. 118-123. (In Russ., abstract in Eng.)

Parametrisches Knotenmodell der Tauchmahlanlage

Zusammenfassung: Die Konstruktion eines physikalischen Modells des Beschleunigungselements als Komponente einer Mahlanlage zur Dispergierung fester Rückstände ist mittels parametrischer Modellierung erfolgt. Diese Studie ermöglichte die Identifizierung von Faktoren aus den Konstruktionsparametern einer Tauchkorbmühle, die den technologischen Prozess der Kombination von Feststoffmahlung und Farb- und Lackmischung beeinflussen. Die Konstruktion dieser Mahlanlage erleichtert die Identifizierung der Prozessmerkmale dieses technologischen Vorgangs anhand seiner Visualisierung.

Modèle de noeud paramétrique rectifieuse submersible

Résumé: Est réalisée la conception d'un modèle physique de l'élément de dispersion en tant qu'unité de broyage pour disperser un précipité solide à l'aide d'une simulation paramétrique. L'étude a permis d'établir les facteurs d'influence des paramètres de la conception du moulage à panier immergé sur le processus technologique combinant le broyage des résidus solides et le mélange des composants du produit de peinture. La conception d'équipements moulants de ce type contribue à identifier les particularités du déroulement de cette opération technologique comme en témoigne de son illustration.

Авторы: ***Тихомиров Вячеслав Александрович*** – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Ермолов Алексей Вениаминович*** – старший преподаватель кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Капранова Анна Борисовна*** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация.