

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. № 2.

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

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

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

**Россия Тамбов
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 09.06.2026. Дата выхода в свет 19.06.2026.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,40; уч.-изд. л. 17,60. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 019.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Адрес издателя: 392000, Тамбовская область, г.о. город Тамбов, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещ. 2. E-mail: tsu@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	180
Мажайцев Е. А., Семенова Е. Г., Балашов В. М. Оптимальное агрегирование интервальных чисел на основе генетического алгоритма при принятии групповых решений.....	180
Альсаиди А. А. М., Мокрозуб В. Г., Матвеев А. С. Системный анализ процесса разработки системы поддержки принятия решений при проектировании технических объектов	187
Вехтева Н. А. Системный анализ процесса аддитивного производства методом FDM как основа для постановки задачи оптимального управления	197
Антипина Н. В. Об оптимальности импульсного процесса в одной модели экономической динамики	211
Бесхмельнов М. И. Методология управления движением групп беспилотных аппаратов (<i>на английском языке</i>)	221
Калинин В. Ф., Погонин В. А. Классификация задач управления коллективом роботов на химическом производстве	233
Пацовский А. П. Выделение и хроматографическое разделение синтетических красителей из различных матриц молочных продуктов	243
Ильинский Д. И., Гостищев Д. А., Безкоровайный В. С. Расширение диапазона измеряемых величин магнитных полей феррозондом при однополярном импульсном возбуждении	252
Балашов А. А., Корпусов Д. В. Разработка подходов применения аппарата нечетких множеств в задаче обнаружения утечки в тепловой камере системы теплоснабжения	260
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	273
Мохаммед С. Д. М., Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В. Перспективы производства биоэтанола в Республике Ирак	273
Фарур Хамза, Борщев В. Я., Титов Г. А. Исследование эффективности смешивания сыпучих материалов в каскадном гравитационном смесителе с использованием математического моделирования в программной среде Altair EDEM.....	284
Чмыхова В. А., Карченкова А. И., Уварова А. А., Гордиенко М. Г. Физико-химические свойства микропорошков молнупиравира, полученных распылительной сушкой.....	298
Ялымова Т. Ю., Соловьева Н. Д. Экспериментальное исследование эффективности способов очистки сточных вод гальванопроизводств от ионов тяжелых металлов	312
Машиностроение. Металлообработка	321
Соколов М. В., Беляев П. С., Туляков Д. В. Влияние режимных переменных и конструктивных параметров валковых машин на энергозатраты и показатели качества резиновых смесей при непрерывном режиме их пластикации ...	321
Материаловедение. Нанотехнологии	330
Киселева О. А., Ярцев В. П. Физико-технические основы работоспособности древесных композитов при циклических и переменных нагрузках.....	330
Королев А. П., Мордасов Д. М. Исследование и применение диффузионной сварки меди и алюминия с ситаллом в производстве приборов летательных аппаратов	343

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	180
Mazhaitsev E. A., Semenov E. G., Balashov V. M. Optimal Aggregation of Interval Numbers Based on a Genetic Algorithm for Group Decision Making.....	180
Alsaïdi A. A. M., Mokrozub V. G., Matveyev A. S. System Analysis of the Process of Developing a Decision Support System in Design of Technical Facilities.....	187
Vekhiteva N. A. System Analysis of the FDM Additive Manufacturing Process as a Basis for Formulating an Optimal Control Problem.....	197
Antipina N. V. On Impulse Process Optimality in One Model of Economic Dynamics.....	211
Beskhmel'nov M. I. Unmanned Vehicle Groups Motion Control Methodology (<i>in English</i>).....	221
Kalinin V. F., Pogonin V. A. Classification of Robotic Team Control Problems in Chemical Industry.....	233
Patsovskiy A. P. Isolation and Chromatographic Separation of Synthetic Dyes from Various Dairy Product Matrixes	243
Ilyinsky D. I., Gostishchev D. A., Bezkorovayny V. S. Extending the Range of Measured Magnetic Field Values with a Fluxgate under Unipolar Pulsed Excitation.....	252
Balashov A. A., Korpusov D. V. Development of Approaches for Fuzzy Set Methods to Detect Leaks in a Heat Chamber of a Supply System.....	260
Chemical Engineering and Related Industries.	
Chemistry	273
Mohammed Sukina Jalal Mohammed, Pakhomov A. N., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V. Prospects for Bioethanol Production in the Republic of Iraq...	273
Farour Hamza, Borshchev V. Ya., Titov G. A. Studying the Efficiency of Mixing Bulk Materials in a Cascade Gravity Mixer Using Mathematical Modeling in the Altair EDEM Software Environment	284
Chmykhova V. A., Karchenkova A. I., Uvarova A. A., Gordienko M. G. Physicochemical Properties of Molnupiravir Micropowders Produced by Spray Drying.....	298
Yalymova T. Yu., Solovieva N. D. Experimental Study of the Efficiency of Methods for Electroplastic Wastewater Treatment from Heavy Metal Ions.....	312
Mechanical Engineering. Metal Treatment	321
Sokolov M. V., Belyaev P. S., Tulyakov D. V. The Influence of Operating Variables and Design Parameters of Roll Machines on Energy Consumption and Quality Indicators of Rubber Compounds under Continuous Plasticization.....	321
Material Science. Nanotechnology	330
Kiseleva O. A., Yartsev V. P. Physical and Technical Foundations of the Performance of Wood Composites under Cyclic and Variable Loads.....	330
Korolev A. P., Mordasov D. M. Research and Application of Diffusion Welding of Copper and Aluminum with Sytall in the Production of Aircraft Instruments	343

ОПТИМАЛЬНОЕ АГРЕГИРОВАНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПРИ ПРИНЯТИИ ГРУППОВЫХ РЕШЕНИЙ

© Е. А. Мажайцев¹, Е. Г. Семенова¹, В. М. Балашов²✉

¹ *Кафедра «Информационные системы и программная инженерия»,
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация;*

² *АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»,
balashov_ym@radar-mms.com; Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Ключевые слова: генетический алгоритм; групповое принятие решений; интервальное число; мера расстояния.

Аннотация: Проблема согласования индивидуальных представлений экспертов для выработки коллективного и обоснованного решения является ключевой в задачах группового принятия решений. В условиях неопределенности мнения экспертов предлагается представить в виде интервальных чисел, так как это позволяет более гибко отразить неточность количественных оценок. Предложен метод оптимального агрегирования интервальных оценок, основанный на минимизации суммы квадратов расстояний от результирующего интервала до оценок всех экспертов. Для решения этой оптимизационной задачи применен генетический алгоритм. Разработанный метод позволяет найти интервальное число, которое наилучшим образом обобщает разрозненные мнения группы, обеспечивая высокую степень консенсуса. Работоспособность и эффективность метода продемонстрированы на численном примере, в котором обобщаются оценки шести экспертов.

Введение

В многокритериальной системе принятия решений (*англ.* Multi-Criteria Decision Making (MCDM)) каждый эксперт оценивает альтернативу по определенным критериям и выставляет ей свой рейтинг или оценку. Лицо, принимающее решение, может предпочесть неточные представления предполагаемым точным оценкам. Именно из-за неточности или расплывчатости, присущей субъективным оценкам различных лиц, принимающих решения, используется теория нечетких множеств и интервальный анализ для принятия решения [1].

Эксперты могут использовать нечеткие числа или интервальные числа для представления своих мнений. Интервальное число будем рассматривать как расширение понятия действительного числа, а также как подмножество действительного ряда. Разработка метода оптимального агрегирования интервальных чисел очень важна при принятии групповых решений. В контексте данной работы под оптимальным понимается такой агрегированный интервал, который минимизирует суммарную «цену отклонения» от мнений всех экспертов. Математически это выражается в минимизации суммы квадратов расстояний от результирующего интервала до каждого из экспертных интервалов.

Для решения задачи наиболее подходящим является генетический алгоритм (ГА), основанный на принципах естественного отбора и генетики [2]. Выбор в пользу генетического алгоритма основан на том, что в решаемой задаче вводятся реальные ограничения или нечеткие интервалы, что сопровождается множеством локальных минимумов в пространстве поиска. Генетический алгоритм позволяет эффективно избегать «застывания» в локальных оптимумах, что критически важно в нахождении наилучшего решения [3]. Кроме того, в перспективе работы со сложными недифференцируемыми метриками состояния (например, на основе теории возможностей) данный метод позволит избежать высоких вычислительных затрат, так как достаточно найти значения целевой функции без необходимости определения ее градиента. Исходными данными для ГА в данной задаче являются целевая функция (минимизируемая сумма квадратов расстояний) и пространство допустимых решений (все возможные интервалы $[x_1, x_2]$, где $a \leq x_1 < x_2 \leq b$). Суть алгоритма заключается в работе с популяцией «особей» (в данном случае – закодированных интервалов), которые эволюционируют через операции селекции (отбор наиболее приспособленных, то есть дающих меньшее значение целевой функции), кроссовера и мутации [4, 5]. Выходом алгоритма является наилучшая найденная особь – интервал $[x_1, x_2]$, который доставляет минимум целевой функции.

Предлагаемый метод оптимального агрегирования

Новизна метода заключается в том, что нечеткие числа интегрируются путем поиска специального интервального числа $([x_1, x_2], a \leq x_1 \leq x_2 \leq b)$, расстояние которого является усредненным значением от всех других нормализованных интервальных чисел, с помощью метода генетических алгоритмов. Целевая функция $f(x_1, x_2)$ строится суммированием всех расстояний между $[x_1, x_2]$ и каждым нормированным интервальным числом.

Пусть имеется: M – множество альтернатив ($m = 1, 2, \dots, M$); K – множество критериев ($k = 1, 2, \dots, K$); E – множество экспертов ($e = 1, 2, \dots, E$); O – интервальная оценка, данная экспертом e для альтернативы m по критерию k в диапазоне

$[a, b]$; w_e – вес эксперта e , отражающий его компетентность ($\sum_{e=1}^E w_e = 1$);

v_k – вес критерия k , отражающий его важность ($\sum_{k=1}^K v_k = 1$).

Суть подхода заключается в нахождении к каждой альтернативе m такой интегральный интервал $O_m^* = x_{m1}, x_{m2}$, который бы наилучшим образом обобщал все экспертные оценки по всем критериям с учетом их весов.

Математическая модель

Целевая функция для альтернативы m имеет вид (1)

$$\min F_m(x_{m1}, x_{m2}) = \sum_{k=1}^K v_k \sum_{e=1}^K w_e D^2(O, O_m)$$

при условии:

$$\begin{cases} O = x_{m1} \cdot x_{m2}; \\ L_m \leq x_{m1} \leq U_m; \\ L_m \leq x_{m2} \leq U_m; \\ x_{m1} < x_{m2}, \end{cases} \quad (1)$$

где $D^2(O, O_m)$ – евклидово расстояние между интервалами; $L_m(\min)$ и $U_m(\max)$ – границы области поиска для альтернативы m .

Выбор евклидовой метрики основан на его прямой связи с методом наименьших квадратов, который реализуется в генетическом алгоритме для нахождения среднего значения (в нашем случае – среднего интервала) [6, 7].

Основная процедура агрегирования интервальных чисел представлена следующим образом[7]:

- определение стратегии кодирования;
- определение метода декодирования;
- построение начальной популяции;
- определение адаптивной функции и адаптивного значения;
- определение критериев отбора;
- определение генетических операторов.

Для проверки предлагаемого метода сформирована выборка значений на основе оценок четырех экспертов для трех разных альтернатив по трем критериям.

В таблице 1 представлен набор интервальных экспертных оценок.

Целевая функция $f(x_1, x_2)$ будет представлять собой сумму квадратов расстояний между агрегированным интервалом $O = (x_1, x_2)$ и интервалами оценок каждого эксперта [3, 9]. Формула для расстояния между интервалами $O = (x_1, x_2)$ и $O_i = (a_i, b_i)$ может быть выражена по формуле

$$D(O, O_i) = \sqrt[2]{(x_1 - a_i)^2 + (x_2 - b_i)^2} . \tag{2}$$

Установим, что точность кодирования $p_{\text{rec}} = 0,0001$, вероятность кроссовера $p_{\text{cro}} = 0,8$, вероятность мутации $p_{\text{mut}} = 0,05$, а длина хромосомы может быть вычислена как $\log_2[(9 - 4)/0,0001 + 1] = 16$. Тогда длина кодировки x_1 и x_2 равна 32.

Для получения эмпирического результата проведен вычислительный эксперимент с использованием программной реализации генетического алгоритма [8]. На рисунке 1 представлен реальный процесс сходимости алгоритма для трех альтернатив, который служит эмпирическим доказательством его работоспособности и эффективности.

Таблица 1

Набор интервальных экспертных оценок

Альтернатива	Критерий	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4
Проект А	Критерий 1	[6, 8]	[7, 9]	[5, 7]	[6, 8]
	Критерий 2	[7, 9]	[8, 10]	[6, 8]	[7, 9]
	Критерий 3	5, 7]	[6, 8]	[4, 6]	[5, 7]
Проект В	Критерий 1	[8, 10]	[7, 9]	[9, 10]	[8, 9]
	Критерий 2	[4, 6]	[5, 7]	[3, 5]	[4, 6]
	Критерий 3	[8, 10]	[7, 9]	[9, 10]	[8, 9]
Проект С	Критерий 1	[5, 7]	[4, 6]	[6, 8]	[5, 7]
	Критерий 2	[5, 7]	[6, 8]	[4, 6]	[5, 7]
	Критерий 3	[6, 8]	[7, 9]	[5, 7]	[6, 8]

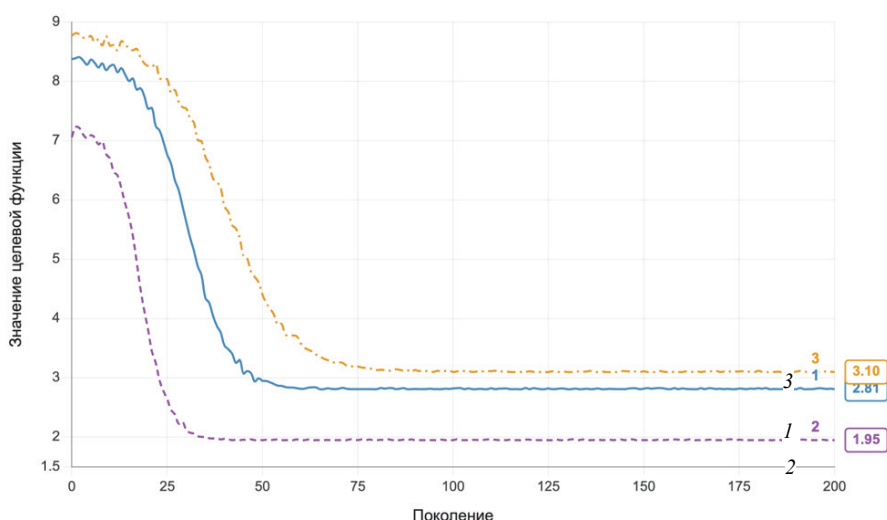


Рис. 1. Эволюция приспособленности мнений экспертов
(сходимость результатов минимальной приспособленности):
1 – проект А, 2 – проект В, 3 – проект С

После 200 итераций получены интегральные интервалы для каждой альтернативы:

- проект А = [6,24; 8,15] – значение целевой функции $F = 2,81$;
- проект В = [7,92; 9,05] – значение целевой функции $F = 1,95$;
- проект С = [5,31; 7,22] – значение целевой функции $F = 3,10$.

Для сравнения альтернатив использовался метод центра точек [9]. Центр интервала $O = (x_1, x_2)$ вычисляется как

$$C = (x_1 + x_2) / 2.$$

В результате получаем значения для проектов: А = 7,2; В = 8,49; С = 6,27. Наивысший интегральный рейтинг у проекта В, который и будет являться предпочтительной альтернативой.

Заключение

Предложен и реализован метод оптимального агрегирования интервальных чисел на основе генетического алгоритма для задач группового принятия решений. В перспективе дальнейших исследований предполагается расширить метод работы с нечеткими интервальными числами, учитывать весовые коэффициенты экспертов в процессе агрегирования, а также провести оптимизацию вычислительной сложности алгоритма для обработки больших объемов данных.

Список литературы

1. Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад ; пер. с фр. В. Б. Тарасова ; под ред. С. А. Орловского. – Москва : Радио и связь, 1990. – 288 с.
2. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems-An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence / J. H. Holland. – Cambridge : MIT Press, 1992. – 232 p.

3. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы : учеб. пособие для студентов вузов / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. – 2-е изд., исправл. и доп. – Москва : Физматлит, 2010. – 368 с.
4. Миркин, Б. Г. Агломеративный консенсусный кластер-анализ с автоматическим выбором числа кластеров / Б. Г. Миркин, А. А. Паринов // Автоматика и телемеханика. – 2024. – № 3. – С. 6–22. doi: 10.31857/S0005231024030014
5. Орлов, А. И. Прикладной статистический анализ : учебник / А. И. Орлов. – Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 813 с.
6. Подиновский, В. В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа: учебник для вузов / В. В. Подиновский. – Москва : Изд-во Юрайт, 2024. – 486 с.
7. Бычков, И. А. Метод обобщенных интервальных оценок для поддержки групповых экспертных решений в условиях неопределенности / И. А. Бычков, М. М. Благовещенская, А. С. Носенко, И. Г. Благовещенский // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2015. – № 4. – С. 63–65.
8. Методы обработки первичных данных в задачах прогнозирования технического состояния больших технических систем / Е. Г. Семенова, В. Ф. Дмитриев, Е. А. Мажайцев, М. С. Смирнова, И. И. Дементьев // Гидроакустика. – 2024. – Т. 60, № 4. – С. 87–93.
9. Многоуровневая обработка данных в информационно-управляющих системах на основе концепции слияния информации / П. В. Филиппов, Я. А. Ивакин, Е. Г. Семенова, М. С. Смирнова // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – Вып. 1(127). – С. 78–80.

Optimal Aggregation of Interval Numbers Based on a Genetic Algorithm for Group Decision Making

© E. A. Mazhaitsev¹, E. G. Semenov¹, V. M. Balashov²✉

¹ *Department of Information Systems and Software Engineering,
Baltic State Technical University VOENMEKH named after D. F. Ustinov,
St. Petersburg, Russian Federation;*

² *JSC Research and Production Enterprise Radar MMS,
balashov_ym@radar-mms.com; St. Petersburg, Russian Federation*

Keywords: genetic algorithm; group decision making; interval number; distance measure.

Abstract: The problem of coordinating individual expert opinions to develop a collective and informed decision is key to group decision-making. Under conditions of uncertainty, expert opinions are proposed to be represented as interval numbers, as this allows for a more flexible reflection of the imprecision of quantitative estimates. A method for optimal aggregation of interval estimates is proposed, based on minimizing the sum of squared distances from the resulting interval to the estimates of all experts. A genetic algorithm is used to solve this optimization problem. The developed method allows one to find an interval number that best summarizes the disparate opinions of the group, ensuring a high degree of consensus. The efficiency and effectiveness of the method are demonstrated using a numerical example that summarizes the estimates of six experts.

References

1. Dyubua D., Prad A. *Teoriya vozmozhnostey. Prilozheniya k predstavleniyu znaniy v informatike* [Possibility Theory. Applications to Knowledge Representation in Computer Science], Moscow: Radio i svyaz', 1990, 288 p. (In Russ.)
2. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems-An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, Cambridge: MIT Press, 1992, 232 p.
3. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. (Ed.) *Geneticheskiye algoritmy* [Genetic Algorithms], Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p. (In Russ.)
4. Mirkin B.G., Parinov A.A. [Agglomerative consensus cluster analysis with automatic cluster number selection], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2024, no. 3, pp. 6-22. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Orlov A.I. *Prikladnoy statisticheskiy analiz : uchebnik* [Applied Statistical Analysis: a Textbook], Moscow: IP R Media, 2022, 813 p. (In Russ.)
6. Podinovskiy V.V. *Mnogokriterialnye zadachi prinyatiya resheniy: teoriya i metody analiza: uchebnik dlya vuzov* [Multicriteria Decision-Making Problems: Theory and Methods of Analysis: A Textbook for Universities], Moscow: Yurait, 2024, 486 p. (In Russ.)
7. Bychkov I.A., Blagoveshchenskaya M.M., Nosenko A.S., Blagoveshchensky I.G. [A method of generalized interval estimates for supporting group expert decisions under uncertainty], *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials], 2015, no. 4, pp. 63-65. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Semenova Ye.G., Dmitriyev V.F., Mazhaytsev Ye.A., Smirnova M.S., Dement'yev I.I. [Methods for Processing Primary Data in Problems of Forecasting the Technical Condition of Large Technical Systems], *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2024, vol. 60, no. 4, pp. 87-93. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Filippov P.V., Ivakin Ya.A., Semenova Ye.G., Smirnova M.S. [Multilevel data processing in information management systems based on the concept of information fusion], *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: development paths], 2022, issue 1(127), pp. 78-80. (In Russ., abstract in Eng.)

Optimale Aggregation von Intervallzahlen mittels eines genetischen Algorithmus bei Gruppenentscheidungen

Zusammenfassung: Die Koordination individueller Expertenmeinungen zur Erarbeitung einer fundierten, kollektiven Lösung ist ein zentrales Problem der Gruppenentscheidung. Unter Bedingungen der Unsicherheit wird vorgeschlagen, Expertenmeinungen als Intervallzahlen darzustellen, da dies eine flexiblere Abbildung der Ungenauigkeit quantitativer Schätzungen ermöglicht. Es ist eine Methode zur optimalen Aggregation von Intervallschätzungen vorgestellt, die auf der Minimierung der Summe der quadrierten Abstände des resultierenden Intervalls zu den Schätzungen aller Experten basiert. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems ist ein genetischer Algorithmus eingesetzt. Die entwickelte Methode ermöglicht es, eine Intervallzahl zu finden, die die unterschiedlichen Meinungen der Gruppe optimal zusammenfasst und einen hohen Konsensgrad gewährleistet. Die Effizienz und Effektivität der Methode sind anhand eines numerischen Beispiels demonstriert, in dem die Schätzungen von sechs Experten zusammengefasst sind.

Агрегация оптимальных чисел интервала на основе алгоритма генетического принятия решений группы

Резюме: Проблема согласования индивидуальных восприятий экспертов с целью принятия коллективного и обоснованного решения является важной в задачах принятия решений группой. В условиях неопределенности предлагается, чтобы мнения экспертов представлялись в виде интервалов, что позволяет более гибко учитывать неопределенность количественных оценок. Предлагается метод оптимальной агрегации оценок интервала, основанный на минимизации суммы квадратов расстояний между результирующим интервалом и оценками всех экспертов. Для решения задачи оптимизации используется генетический алгоритм. Предложенная методика позволяет найти чисел интервалов, которые наилучшим образом обобщают мнения группы, обеспечивая при этом высокий уровень согласия. Приведены доказательства способности и эффективности метода на примере численного обобщения оценок шести экспертов.

Авторы: *Мажайцев Евгений Александрович* – аспирант кафедры «Информационные системы и программная инженерия»; *Семенова Елена Георгиевна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и программная инженерия», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, 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.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© А. А. М. Альсаиди¹, В. Г. Мокрозуб¹✉, А. С. Матвеев¹

¹ Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
mokrozubv@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: информационная модель; кожухотрубчатый теплообменник; проектирование технических объектов; система поддержки принятия решений; функциональная модель.

Аннотация: На примере кожухотрубчатого теплообменника представлена методика построения информационных моделей для разработки систем поддержки принятия решений (СППР) при проектировании технических объектов. Поставлена оптимизационная задача проектирования СППР. Определены направления исследований по способам компьютерного представления информационных моделей технических объектов.

Введение

Создание химических производств (ХП) – сложный многоэтапный иерархический процесс, включающий в себя этапы маркетинговых исследований, разработку проекта, изготовление оборудования, монтаж и др. В свою очередь разработка проекта включает технологическое проектирование, технико-экономическое проектирование и др.

Выпуск химических продуктов осуществляется в соответствии с технологическим регламентом, в котором описываются все операции (химические превращения, сушка, фильтрация, нагрев, охлаждение и др.), которые необходимо провести, для того чтобы из заданного сырья получить продукты нужного качества. Эти операции проводятся в соответствующих аппаратах, которые соединены между собой в химико-технологическую систему (ХТС).

Проектирование ХТС осуществляется на стадии технологического проектирования. На рисунке 1 представлено дерево задач технологического проектирования ХТС, в котором выделены две основные задачи: аппаратное оформление и компоновка оборудования.

Рассмотрим постановку задач проектирования ХП на примере проектирования ХТС.

Пусть X – множество всех возможных конструктивных и режимных характеристик ХТС; $XD \subset X$ – множество допустимых конструктивных и технологических параметров, удовлетворяющих требованиям задания на проектирование; tz – исходные данные. Обозначим множество допустимых вариантов $XTC = \{x_{tc_k}\}$, $k = 1, \dots, K$, K – число допустимых вариантов ХТС. Введем:

- функцию эффективности $FE(x_{tc})$, например, приведенные затраты;
- оценку эффективности u ;
- предельное значение функции эффективности $FD(tz)$.

Задачу проектирования ХТС можно представить как задачу выбора такой $x_{tc} \in XTC$ для заданного tz , для которой выполняется условие



Рис. 1. Дерево задач технологического проектирования ХП

$$FE(xtc) \text{ и } FD(tz). \quad (1)$$

В частном случае u представляет собой отношение $\leq$, а $FD(tz)$ – предельно допустимая величина оценки эффективности ХТС, например, приведенные затраты. На практике из множества ХТС выбирается одно решение, $xtc^* \in XTC$, которое оформляется в виде технической документации (технического проекта) tp . Если xtc^* выбирается таким образом, что

$$FE(xtc^*) = extr FD(tz), \quad (2)$$

то говорят о задаче оптимизации.

Постановка и решение отдельных задач проектирования ХП рассматриваются во многих научных публикациях. В работе [1] приведен аналитический обзор современного состояния проектирования многоассортиментных химических производств, в исследовании [2] представлена задача синтеза оптимальной системы теплообменных установок, в [3] рассмотрена процедурная модель проектирования ХП, в [4, 5] и многих других публикациях рассмотрены вопросы проектирования аппаратов различных типов. При этом основное внимание авторы уделяют постановке и решению задач вида (1) и (2) и практически не затрагивают вопросы разработки систем поддержки принятия решений (СППР), которые предназначены для решения задач (1) и (2).

Цель работы – постановка задачи разработки СППР при конструировании оборудования ХП и определение путей ее решения на примере задачи конструкторской разработки кожухотрубчатого теплообменника (КТТ).

Процедура создания СППР

Конструкторская разработка независимо от проектируемого аппарата включает в себя расчеты (тепловой, гидравлический, механический), разработку чертежа общего вида аппарата (3D-модели), сборочных чертежей и чертежей деталей, текстовых документов (спецификации, технические условия и др.).

Обозначим задачу конструкторской разработки как z_0 . Она декомпозируется на ряд подзадач $z_1, z_2, \dots, z_I$, где I – число подзадач первого уровня. Каждая из перечисленных задач может в свою очередь быть декомпозирована на ряд подзадач второго уровня и т.д. Таким образом, строится дерево задач, которое является основой для разработки структуры СППР при проектировании химических аппаратов (рис. 2). В большинстве случаев каждая подзадача представляет собой определенный модуль (подсистему) СППР. Между модулями устанавливаются координирующие и информационные связи (рис. 3). Координирующая связь представляет собой информационный поток, передаваемый от вышестоящего модуля нижестоящему, информационная связь – информационный поток, передаваемый от нижестоящих модулей вышестоящим.

Обозначим $DZ = (Z, SZ)$ – дерево задач (целей) проектирования аппарата, $Z = \{z_i\}, i = 0, \dots, I$ – задачи, $SZ = \{sz_{km}\}, k \in 0, \dots, I, m \in 0, \dots, I, k \neq m$ – подчиненность задач (ребра). Решение задач Z осуществляется с помощью СППР.

Обозначим SYS – СППР, которая реализует дерево задач DZ . Процедуру создания SYS обозначим как $FSYS : DZ \rightarrow SYS$. В свою очередь SYS представляет собой набор подсистем $SYS = \{sys_r\}, r = 0, \dots, R, sys_r$ – элемент системы SYS , R – число подсистем.

В основе выполнения системой SYS дерева задач DZ лежит функциональная модель FZ [6], которая определяет порядок получения технического проекта pr разрабатываемого аппарата по исходным данным технического задания tz .

При этом используются знания предметной области, которые должны быть формализованы для компьютерной реализации. Обозначим формализованные знания как информационную модель предметной области IM , тогда функциональная модель FZ запишется следующим образом:

$$FZ : tz \xrightarrow{IM} pr. \tag{3}$$

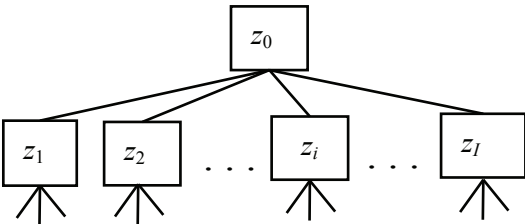


Рис. 2. Обобщенная структура дерева задач разработки конструкторской документации аппарата

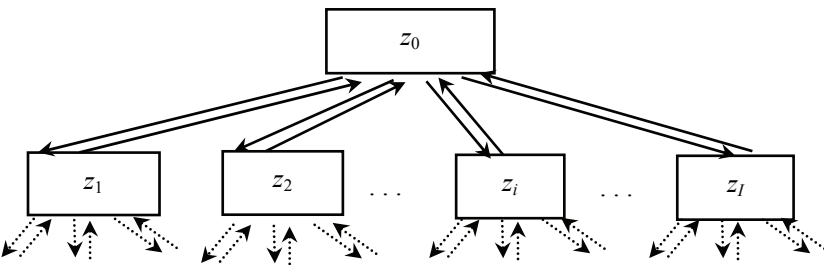


Рис. 3. Иерархическая структура СППР при проектировании технологических аппаратов

Обозначим процедуру создания функциональной модели по дереву целей как FFZ , то есть

$$FFZ : DZ \rightarrow FZ . \quad (4)$$

Информационная модель IM составляется в результате формализации знаний предметной области PO . Обозначим процедуру создания информационной модели из знаний предметной области FIM , то есть

$$FIM : PO \rightarrow IM . \quad (5)$$

Информационная модель IM хранится, поддерживается в актуальном состоянии и обрабатывается в информационном хранилище, например, в реляционной базе данных (**РБД**) или онтологии. Для этих целей разрабатывается информационное обеспечение IO . Обозначим процедуру создания информационного обеспечения СППР, как FIO , то есть

$$FIO : IM \rightarrow IO . \quad (6)$$

Как было сказано выше, функциональная модель FZ описывает процесс получения проектного решения на основании данных технического задания. В СППР функциональная модель реализована в виде соответствующего программного обеспечения (компьютерная реализация FZ).

Обозначим KF как компьютерную реализацию функциональной модели FZ . Процедуру создания KF обозначим как FKF , то есть

$$FKF : FZ \rightarrow KF . \quad (7)$$

На основании сказанного процедуру создания СППР для выполнения дерева задач $FSYS : DZ \rightarrow SYS$ можно записать кортежем

$$FSYS = (FFZ, FIM, FIO, FKF) .$$

При этом FFZ и FIM определяются предметной областью, а FIO и FKF обуславливают методы создания программного и информационного обеспечения.

В современных СППР функционирование и интеграция отдельных подсистем в единую систему осуществляется через единое информационное обеспечение (пространство) по схеме, представленной на рис. 4. Для решения множества задач Z автоматизированной системы SYS необходимо множество информационных моделей, позволяющих решать задачи Z . Обозначим $IM = \{im_i\}, i = 0, \dots, I$, – множество информационных моделей, требующихся для решения задач Z . Для компьютерного представления информационных моделей необходимо информационное хранилище (база данных, онтология, нейронная сеть и др.). Обозначим $IO = \{io_i\}, i = 0, \dots, I$, – множество информационных хранилищ для компьютерного представления множества IM , причем $IO \subset DO$, где DO – множество (домен) существующих информационных хранилищ.

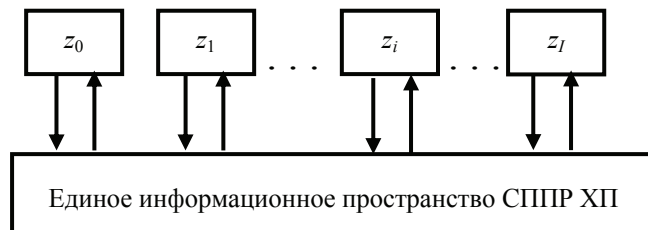


Рис. 4. Схема взаимодействия задач (подсистем) СППР

Таким образом, каждую подсистему автоматизированной системы SYS можно представить кортежем $sys_i = (z_i, im_i, io_i)$, $i = 0, \dots, I$.

В свою очередь способ компьютерного представления ИМ определяет необходимое программное обеспечение для ее обработки. Так, для обработки данных в РБД необходимо писать программы на SQL, если для представления информационной модели использовать редактор онтологий, например, Protégé, то можно использовать встроенный в редактор обработчик (reasoner), но запросы (ввод исходных данных) пишутся на SPARQL. При использовании методов машинного обучения необходимо выбрать метод машинного обучения и подготовить информацию для обучения и тестирования.

Затраты (время, себестоимость) на создание подсистемы sys_i в значительной степени зависят от выбранного информационного хранилища io_i . Обозначим функцию определения затрат на создание информационного хранилища $S(io)$. Тогда задача выбора информационного хранилища запишется следующим образом. Из множества возможных информационных хранилищ DO необходимо выбрать такое $io^* \in DO$, для которого

$$S(io^*) = \min_{io \in DO} (S(io)). \quad (8)$$

Далее на примере создания СППР при конструкторской разработке КТТ рассматривается решение задач (4), (5).

Задача построения функциональной модели проектирования КТТ FFZ

В основе построения функциональной модели лежит методология IDEF. Функциональная модель FM (3) представляет собой теоретико-множественное представление функциональной диаграммы IDEF0.

На рисунке 5 представлены функциональные диаграммы IDEF0 верхнего и первого уровня конструкторской разработки КТТ.

Исходные данные представлены в техническом задании tz : свойства теплоносителей, их температура, давление, поверхность теплообмена и др. Результат pr – 3D-модель, чертеж общего вида и чертежи деталей.

Основные функциональные блоки (задачи):

- определение материала изготовления элементов КТТ. Материал элементов подбирается в зависимости от коррозионных свойств теплоносителей и температуры;

- определение исполнения КТТ (с неподвижными трубными решетками, температурным компенсатором, плавающей головкой или с U-образными трубами). Исполнение КТТ зависит от разности температур теплоносителей, давления в кожухе и трубах, материала отдельных его элементов;

- определение размеров КТТ. Основные размеры определяются по нормативным документам, например, по [7] в зависимости от необходимой поверхности теплообмена, исполнения теплообменника, заданной длины труб или числа ходов;

- построение 3D-моделей и чертежей осуществляется на основании ранее определенных размеров.

Основные информационные потоки:

C_1, C_2, C_3, C_4 – управления, в первую очередь – это нормативные документы (ГОСТы, ОСТы, ТУ, стандарты организаций и др.);

I_1, I_2, I_3, I_4 – результаты решения соответствующих задач;

$I_{21}^1, I_{32}^1, I_{43}^1$ – соответствующие обратные связи.

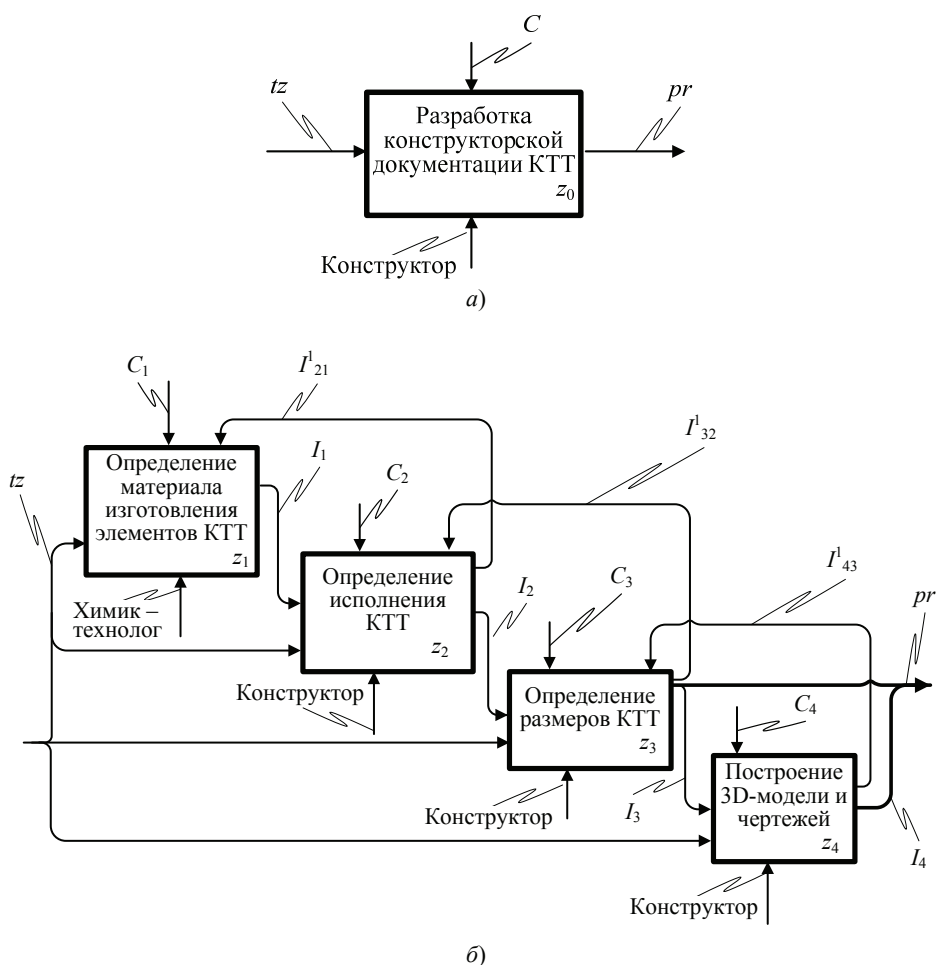


Рис. 5. Диаграммы IDEF0 верхнего (а) и первого (б) уровней конструкторской разработки КТТ

Функциональная FZ и информационная IM модели в соответствии с рис. 5 могут быть записаны как:

$$\begin{aligned}
 FZ &= (fz_1, fz_2, fz_3, fz_4); \\
 IM &= (im_1, im_2, im_3, im_4); \\
 fz_1 &: tz \cup C_1 \cup I_{21}^1 \xrightarrow{im_1} I_1; \\
 fz_2 &: tz \cup I_1 \cup C_2 \cup I_{32}^1 \xrightarrow{im_2} I_2; \\
 fz_3 &: tz \cup I_2 \cup C_3 \cup I_{43}^1 \xrightarrow{im_3} I_3; \\
 fz_4 &: tz \cup I_3 \cup C_4 \xrightarrow{im_4} I_4,
 \end{aligned}$$

где $fz_1, fz_2, fz_3, fz_4, im_1, im_2, im_3, im_4$ – функциональные и информационные модели определения материала изготовления элементов, исполнения КТТ, размеров и построения 3D-модели и чертежей соответственно.

Задача построения информационной модели КТТ *FIM*

Обозначим:

$Sr = \{sr_{isr}\}, isr = 1, \dots, Isr$ – множество возможных теплоносителей, $Sr = \{\text{аммиак, спирт метиловый, толуол, уксусная кислота, ацетон, } \dots\}$;

$Mt = \{mt_{imt}\}, imt = 1, \dots, Imt$ – возможные материалы, из которых изготавливаются элементы КТТ, $Mt = \{\text{Ст3, 12X18H10T, X17H13M2T, } \dots\}$;

$E = \{e_{ie}\}, ie = 1, \dots, Ie$ – элементы КТТ, $E = \{\text{кожух, крышки, трубы, трубные решетки, перегородки, прокладки кожуха, прокладки распределительной камеры}\}$;

$M = \{m_{im}\}, im = 1, \dots, Im$ – исполнения КТТ по материалу, $M = \{M1, M3, M8, M9, M10, M11, M12, M17, M19, M20, M21, M22, M23, M24\}$. Например, M11: кожух – сталь 10X17H13M2T; крышки распределительной камеры – сталь 16ГС; трубы – сталь 20; трубная решетка и перегородки – сталь 10X17H13M2T; прокладка кожуха и распределительной камеры – картон асбестовый;

$Pt = \{pt_{ipt}\}, ipt = 1, \dots, Ipt$ – давление в трубах, МПа, $Pt = \{0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0\}$;

$Pk = \{pt_{ipk}\}, ipk = 1, \dots, Ipk$ – давление в кожухе, МПа, $Pk = \{0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0\}$;

Dt, Dl – допускаемые разности соответственно температур, °C, и удлинений, мм, кожуха и труб;

Tt, Tk – температуры трубы и кожуха соответственно, °C;

$Dv = \{dv_{idv}\}, idv = 1, \dots, Idv$ – диаметр кожуха внутренний, мм, $Dv = \{400, 600, 800, 1000, 1200, 1400\}$;

$Dn = \{dn_{idn}\}, idn = 1, \dots, Idn$ – диаметр кожуха наружный, мм (задается при малых диаметрах), $Dn = \{159, 273, 325, 426, 630\}$;

$Me = \{Mk, Mkr, Mt, Mtr, Mp, Mpk, Mpr\}$ – материалы элементов теплообменника: Mk – кожуха, Mkr – камеры распределительной, Mt – труб, Mtr – трубной решетки, Mp – перегородки, Mpk – прокладки кожуха, Mpr – прокладки камеры распределительной соответственно;

$Tp = \{tp_{itp}\}, itp = 1, \dots, Itp$, $Tp = \{\text{ТН, ТК, ХН, ХК, КН, КК, ИН, ИК}\}$ – типы теплообменников: ТН, ХН – теплообменник и холодильник с неподвижными трубными решетками; ТК, ХК – теплообменник и холодильник с компенсатором на кожухе и др;

$R = \{r_{ir}\}, ir = 1, \dots, IR$ – размеры КТТ (внутренний диаметр кожуха; длина труб; число ходов по трубам; расстояние между центрами штуцеров входа-выхода в межтрубное пространство; условный диаметр штуцеров входа-выхода в трубное пространство; условный диаметр штуцеров входа-выхода в межтрубное пространство и др);

F – площадь поверхности теплообмена;

n – число ходов по трубам;

$d3$ – 3D-модель и чертежи КТТ.

Информационная модель *IM* технической системы представляет собой кортеж $IM = (O, Rim)$, где O – множество элементов системы и их свойств, Rim – множество связей элементов и их свойств.

Информационные модели im_1, im_2, im_3, im_4 формально запишем в виде (9) – (12).

$$im_1 = (S, Me, Rim_1), \quad (9)$$

$$im_2 = (Me, Tt, Tk, dv, dn, pt, pk, lt, tp, Rim_2), \quad (10)$$

$$im_3 = (F, tp, n, R, Dt, Dl, Rim_3), \quad (11)$$

$$im_4 = (R, tp, E, d3, Rim_4), \quad (12)$$

где $Rim_1, Rim_2, Rim_3, Rim_4$ – множество связей между свойствами КТТ. Пример элемента множества Rim_3 – «Если $Tt < 250$ И ($dn = 159$ ИЛИ $dn = 273$ ИЛИ $dn = 325$) И ($pk = 1,6$ ИЛИ $pk = 2,5$ ИЛИ $pk = 4,0$) И ($m = M1$ ИЛИ $m = M17$) И $Dt \leq 30$, ТО $tp = ТН$ ».

Задача проектирования теплообменника (13) – (16) заключается в следующем. Для заданных теплоносителей $sr^1 \in Sr, sr^2 \in Sr$; температуры трубы Tt ; температуры кожуха Tk ; давления в трубах pt ; давления в кожухе pk ; площади поверхности теплообмена F найти тип теплообменника $tp \in Tp$, его размеры R и построить 3D-модель и чертежи КТТ:

$$fim_1 : im_1(sr^1, sr^2) \rightarrow Me, \quad (13)$$

$$fim_2 : im_2(Me, Tt, Tk, dv, dn, pt, pk, lt) \rightarrow tp, \quad (14)$$

$$fim_3 : im_3(F, tp, n) \rightarrow R, \quad (15)$$

$$fim_4 : im_4(R, tp, E) \rightarrow d3, \quad (16)$$

где $fim_1, fim_2, fim_3, fim_4$ оператор обработки im_1, im_2, im_3, im_4 для определения материалов элементов КТТ, типа КТТ, размеров КТТ и построения 3D-модели и чертежей КТТ.

Заключение

Приведено формальное описание процесса разработки СППР при проектировании технических объектов. На примере разработки конструкторской документации кожухотрубчатого теплообменника рассмотрено создание функциональной и информационной модели технического объекта.

Дальнейшие исследования будут проводиться в направлении сравнения способов компьютерного представления и обработки информационных моделей для решения оптимизационной задачи (8) проектирования СППР технических объектов. Предполагается использовать реляционную базу данных, онтологию и машинное обучение.

Список литературы

1. Егоров, А. Ф. Современное состояние в области анализа, синтеза и оптимального функционирования многоассортиментных цифровых химических производств: аналитический обзор / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, П. Г. Михайлова // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55, № 2. – С. 154–187. doi: 10.31857/S0040357121010061
2. Синтез оптимальной системы рекуперативного теплообмена установок гидрокрекинга и гидроочистки / Э. А. Исхаков, Р. Ф. Калимуллин, И. И. Емельянов [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 4. – С. 102–111. doi: 10.55421/3034-4689_2025_28_4_102
3. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326–331. doi: 10.1007/s10556-017-0342-6

4. Алгоритм и программный комплекс оптимального технологического проектирования простых ректификационных колонн / Н. Н. Зиятдинов, И. И. Емельянов, А. А. Рыжова, П. С. Чернаков // Тонкие химические технологии. – 2021. – Т. 16, № 5. – С. 379–389. doi: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-379-389

5. Карпушкин, С. В. Принципы автоматизированного проектирования технологического оборудования многоассортиментных химических производств / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 640–651. doi: 10.17277/vestnik.2024.04.pp.640-651

6. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6–16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016

7. ТУ 3612-024-00220302-02. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. – ОАО «ВНИИнефтемаш», 2002. – 112 с.

System Analysis of the Process of Developing a Decision Support System in Design of Technical Facilities

© A. A. M. Alsaïdi¹, V. G. Mokrozub¹✉, A. S. Matveyev¹

¹ Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
mokrozubv@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russian Federation

Keywords: information model; shell-and-tube heat exchanger; design of technical facilities; decision support system; functional model.

Abstract: Using a shell-and-tube heat exchanger as an example, this paper presents a methodology for constructing information models for developing decision support systems (DSS) for the design of technical facilities. An optimization problem for the design of a DSS is formulated. The directions of research on methods of computer representation of information models of technical objects have been identified.

References

1. Yegorov A.F., Savitskaya T.V., Mikhaylova P.G. [Current state in the field of analysis, synthesis and optimal operation of multi-product digital chemical production: an analytical review], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 2021, vol. 55, no. 2, pp. 154-187. doi: 10.31857/S0040357121010061 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Iskhakov E.A., Kalimullin R.F., Yemel'yanov I.I. [et al.], [Synthesis of an optimal recuperative heat exchange system for hydrocracking and hydrotreating units] *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2025, vol. 28, no. 4, pp. 102-111. doi: 10.55421/3034-4689_2025_28_4_102 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Mokrozub A.V. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, vol. 53, no. 5-6, pp. 326-331. doi: 10.1007/s10556-017-0342-6

4. Ziyatdinov N.N., Emel'yanov I.I., Ryzhova A.A., Chernakov P.S. [Algorithm and software package for optimal technological design of simple distillation columns],

Tonkiye khimicheskiye tekhnologii [Fine chemical technologies], 2021, vol. 16, no. 5, pp. 379-389. doi: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-379-389 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N. [Principles of Automated Design of Technological Equipment for Multi-Product Chemical Production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 640-651. doi: 10.17277/vestnik.2024.04.pp.640-651 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Sannikov S.A., Mokrozub V.G., Kalistratov M.S. [Systems analysis of the design process of lines for electrochemical and chemical processing of parts], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 6-16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016 (In Russ., abstract in Eng.)

7. TU 3612-024-00220302-02. *Apparaty teploobmennyye kozhukhotrubchatyye s nepodvizhnymi trubnymi reshetkami i kozhukhotrubchatyye s temperaturnym kompensatorom na kozhukhe* [Shell-and-tube heat exchangers with fixed tube sheets and shell-and-tube heat exchangers with a temperature compensator on the shell], OAO "VNIIneftemash", 2002, 112 p. (In Russ.)

Systemanalyse des Entwicklungsprozesses eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Planung technischer Anlagen

Zusammenfassung: Anhand des Rohrbündelwärmetauschers ist in diesem Beitrag eine Methodik zur Erstellung von Informationsmodellen für die Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen (DSS) zur Planung technischer Anlagen vorgestellt. Es ist ein Optimierungsproblem für die Entwicklung eines DSS formuliert. Es sind Forschungsrichtungen für Methoden zur computergestützten Darstellung von Informationsmodellen technischer Anlagen aufgezeigt.

Analyse systématique du processus de développement du système d'aide à la décision dans la conception des installations technologiques

Résumé: A l'exemple d'un échangeur thermique à enveloppe, est présentée une méthode de la construction des modèles d'information pour la conception des systèmes de l'aide à la décision (SAD) lors de la projection des installations techniques. Est définie la tâche de l'optimisation de la conception de SAD. Sont définis des domaines de la recherche sur les moyens de présenter par ordinateur des modèles informatisés d'objets techniques.

Авторы: *Альсаиди Аббас Атван Мохавс* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Мокрозуб Владимир Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Матвеев Александр Сергеевич* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ FDM КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

© Н. А. Вехтева¹✉

¹ Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
magicanolner@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: 3D-печать, FDM-технология, аддитивное производство, системный анализ.

Аннотация: Представлен системный анализ аддитивного производства, в результате которого предложена иерархическая декомпозиция технологического цикла на пять функциональных подсистем с формализованным описанием информационных, материальных и управляющих потоков. Показано, что система является искусственной, открытой и детерминированной, что допускает применение методов теории управления. Установлено, что варьирование пространственной ориентации модели позволяет влиять на время печати, расход материала и потребность в поддерживающих конструкциях без модификации оборудования. Предложена математическая постановка задачи многокритериальной оптимизации с нормализованными показателями эффективности.

Введение

Современное развитие промышленности характеризуется усилением спроса на продукцию с индивидуальными характеристиками, сокращением жизненного цикла изделий и ростом доли мелкосерийного производства [1]. В этих условиях аддитивные технологии приобретают все большее значение благодаря своей гибкости, минимальным затратам на подготовку производства и способности изготавливать геометрически сложные объекты без использования специальной оснастки.

Метод послойного наплавления (*англ.* Fused Deposition Modeling (**FDM**)) занимает значительную долю рынка аддитивного оборудования для малого и среднего бизнеса [2]. Однако на практике сохраняются существенные проблемы, особенно при изготовлении изделий нетиповой геометрии. Дефекты формы изделия становятся особенно критичными при производстве функциональных элементов, где точность определяет работоспособность всего изделия. Одновременно остаются нерешенными вопросы экономической целесообразности: нерациональный расход материала, время печати зачастую оказывается значительно выше расчетного [3].

При этом оборудование и материалы для аддитивного производства в условиях мелкосерийного выпуска, как правило, строго определены техническим заданием и не подлежат замене, что ограничивает возможности влияния на результат за счет модернизации технической базы. Поэтому управление качеством и ресурсоемкостью без модификации оборудования становится приоритетной задачей.

Цель статьи – проведение системного анализа процесса аддитивного производства методом FDM в целях выявления управляющих воздействий и обоснования возможности постановки задачи оптимального управления.

Декомпозиция системы аддитивного производства на подсистемы

В рамках проводимого исследования система аддитивного производства (АП) методом FDM представляет собой целостную совокупность взаимосвязанных элементов, выполняющих определенные функции и обеспечивающих преобразование исходных данных и материалов в конечный продукт – готовое изделие.

Цель системы: получение готового изделия по техническому заданию.

Задачи системы:

- изучение реального объекта или его двумерного представления;
- преобразование информации в технологически корректную цифровую модель;
- подготовка оборудования и материала печати;
- формообразование физического объекта методом аддитивного наращивания;
- доводка изделия до эксплуатационной пригодности.

Цель системного анализа заключается в выявлении ключевых точек влияния на эффективность мелкосерийного производства АП, а задача – в построении модели исследуемого объекта и анализе поведения системы [4, 5].

Система была декомпозирована на пять функциональных подсистем, образующих последовательный технологический цикл (рис. 1). Каждая подсистема выполняет специализированную функцию, имеет четко определенные входы и выходы, а также взаимодействует с соседними подсистемами через информационные, материальные и управляющие связи.

Подсистема «Проектирование трехмерного цифрового чертежа».

Входные данные: реальный физический объект или его двумерное представление в виде технического чертежа, эскиза, рисунка; техническое задание, содержащее габаритные размеры, конструктивные особенности и функциональные требования к изделию.

Выходные данные: файл с описанием трехмерного цифрового чертежа (ТЦЧ) – трехмерное информационное описание формы изделия в формате, пригодном для дальнейшей обработки.

Функцией подсистемы является преобразование аналоговой или графической информации в технологически адаптированную цифровую модель, пригодную для машинного исполнения. Подсистема служит интерфейсом между физическим миром и цифровым производственным циклом, обеспечивая переход от концепции к технологически пригодной модели.

При проектировании ТЦЧ для печати в специализированных системах автоматизированного проектирования), например, КОМПАС 3D или Blender, специалист должен учитывать все требования [6], указанные в техническом задании, которое содержит особенности технологии печати и программы, в которую будет загружен результат выполнения задачи.

В процессе создания ТЦЧ используется следующее понятие: полигональная сетка (топология) – поверхность, которая обычно состоит из множества полигонов (граней), соединенных общими ребрами. Она представляет собой набор вершин, ребер и граней, которые определяют форму многогранного объекта в трехмерной компьютерной графике [7].

Требования к полигональной сетке при проектировании и создании ТЦЧ для печати FDM включают: отсутствие пересекающихся граней и ребер; представление полигональной сетки в виде одного единственного цельного твердотельного объекта; замкнутость и целостность полигональной сетки; ограничение количества полигонов в соответствии с возможностями ПО для последующей обработки; минимальная толщина стенок и деталей не менее минимального порога, определяемого диаметром сопла принтера и заданного в техническом задании; соответствие габаритов модели рабочей зоне принтера; при превышении – декомпозиция на сборные части.

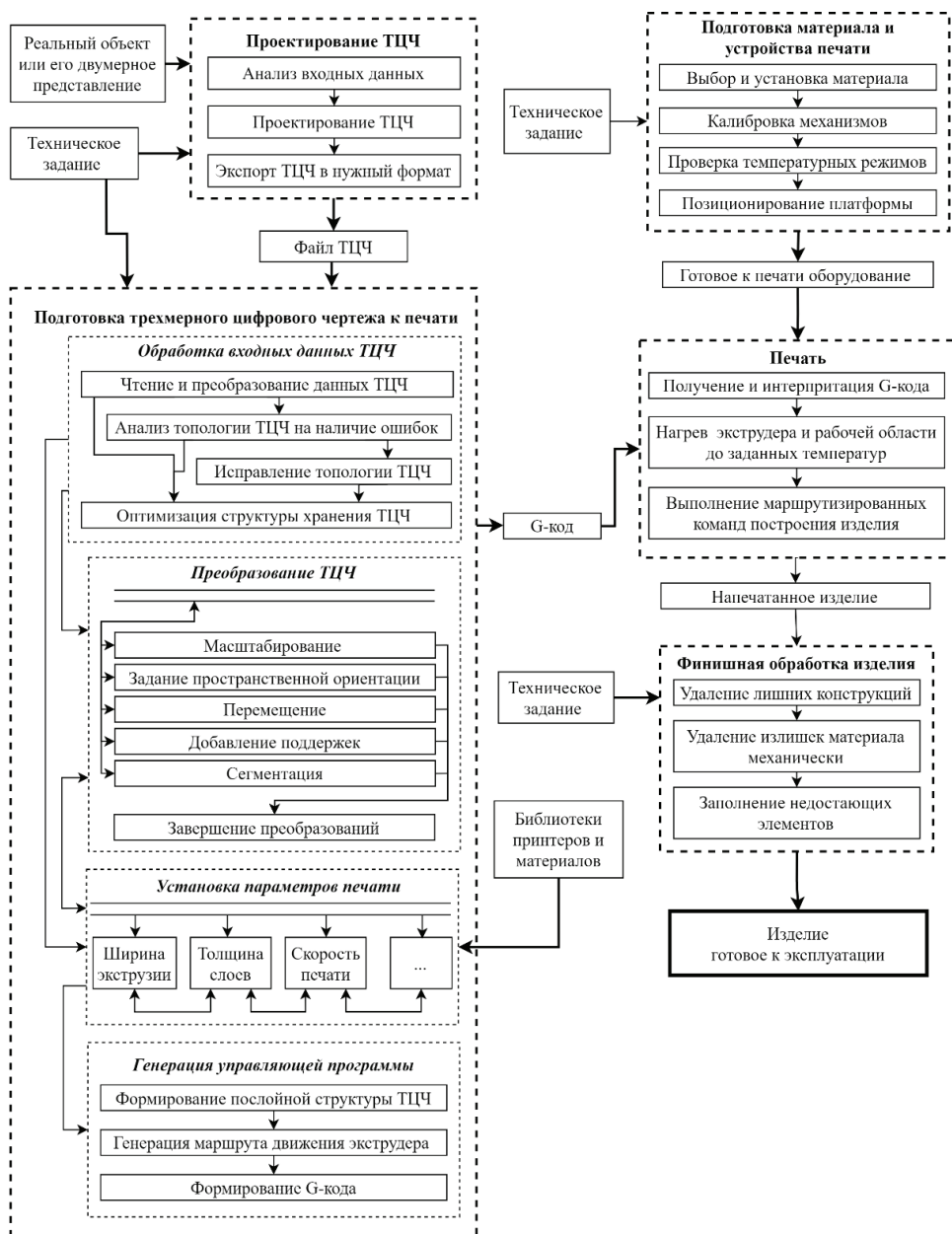


Рис. 1. Схема взаимодействия подсистем системы АП

При их несоблюдении изделие может оказаться бракованным или не напечататься вовсе.

После проверки всех требований к ТЦЧ проводится преобразование CAD-модели в формат, совместимый с процессом аддитивного производства (чаще всего STL (*англ.* Standard Tessellation Language или Standard Triangulation Language), с контролем качества тесселяции (аппроксимации поверхности треугольниками).

Формат STL – стандарт, широко используемый для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях быстрого прототипирования, обычно, методом стереолитографии [8, 9]. STL-формат описывает трехмерные

поверхности объекта, используя сетку взаимосвязанных треугольников (полигонов), заданных координатами вершин и вектором нормали.

Точность печати зависит от точности аппроксимации криволинейных ребер и линий очертания ТЦЧ отрезками прямых линий, а криволинейных поверхностей – треугольниками. Основной проблемой является некорректное представление геометрии изделия в формате STL. Согласно проведенному исследованию, наиболее типичными ошибками являются вырождение ячеек при совпадении двух и более вершин треугольника, образование пересекающихся треугольников, незамкнутость контура, вырождение ячеек при наличии коллинеарных ребер описываемого треугольника [8]. Данные ошибки приводят к невозможности корректного расчета траекторий печатающей головки и формированию дефектов в готовом изделии.

Управляющие воздействия на данном этапе включают выбор методов моделирования, точность аппроксимации поверхностей, а также учет технологических ограничений последующих этапов производства.

Подсистема «Подготовка трехмерного цифрового чертежа к печати».

Входные данные: файл с описанием ТЦЧ, например, в формате STL, техническое задание. Выходные данные: управляющий G-код, пригодный для интерпретации устройством печати.

Функция подсистемы заключается в преобразовании геометрической модели в последовательность команд управления движением экструдера и терморегуляторов с учетом технологических ограничений (времени печати, объема материала и требований к геометрической точности).

Подсистема выполняет функции импорта и проверки геометрии ТЦЧ, его преобразования, задания параметров печати, генерации управляющей программы экструдера и экспорта данных в машинный G-код – условное наименование языка программирования устройств с числовым программным управлением [10].

Программное обеспечение, выполняющее эти функции, называется слайсером (*англ.* Slicer) – компьютерная программа, которая преобразует виртуальную трехмерную модель объекта в машинный код для управления печатью. Наиболее популярные программы: Simplify3D, Cura, 3DPrinterOS, Craftware, Slic3r и др. [11]. Выбор программы может зависеть как от устройства печати (программа поставляется с ним), так и от необходимого для решения задачи функционала.

Подсистема «Подготовка ТЦЧ к печати» является сложной по своей функциональной структуре. В целях углубленного системного анализа она была декомпозирована на следующие функциональные компоненты.

Первый компонент – обработка входных данных ТЦЧ. Вход: STL-файл или аналогичное представление модели. Выход: ТЦЧ во внутреннем представлении программного продукта. Функция: импорт цифровой модели и проверка ее геометрической корректности. Операции включают чтение данных ТЦЧ из файла и преобразование их во внутренний формат слайсера, анализ топологии на наличие ошибок, автоматическое или ручное исправление дефектов с использованием инструментов слайсера или специализированного ПО (например, MeshLab, Netfabb), оптимизация структуры хранения ТЦЧ во внутреннем представлении (при необходимости).

Различные слайсеры по-разному интерпретируют один и тот же STL-файл, особенно если он содержит ошибки. Это приводит к непредсказуемости результатов: ТЦЧ, корректно напечатанный в одном программном продукте, может вызвать сбой или дать грубые дефекты в другом [12, 13].

Вторым компонентом является преобразование ТЦЧ. Входные данные: данные ТЦЧ во внутреннем представлении слайсера. Выходные данные: измененные данные ТЦЧ. Функция: преобразование геометрии ТЦЧ для достижения требований к печати.

К операциям преобразования относятся следующие:

- задание пространственной ориентации (выбор угла поворота по осям);
- масштабирование до требуемых размеров;
- перемещение в пределах рабочей зоны принтера;
- добавление поддерживающих структур (поддержек, опорных конструкций);
- сегментация крупногабаритных моделей на сборные части при необходимости.

При выборе масштаба и пространственного положения ТЦЧ необходимо соблюдать габаритные ограничения рабочей камеры принтера, поскольку их превышение делает процесс формообразования физически невозможным.

Технология послойного наплавления имеет определенные ограничения по сложности создаваемых геометрических форм. Например, создание нависающих конструкций (таких, как сталактиты) невозможно само по себе ввиду отсутствия необходимой поддержки. Это ограничение компенсируется созданием временных опорных конструкций, удаляемых по завершении печати [14].

Опорные конструкции – это временные структуры, формируемые из печатного материала под нависающими элементами изделия для предотвращения их деформации или обрушения под действием силы тяжести. В технологии FDM поддержки реализуются в виде регулярных или адаптивных решетчатых структур («решетка», «зигзаг», «древовидная»), которые создают опорную поверхность для нависающих слоев.

Поддержки могут быть однослойными (линейными) или объемными, сплошными или с заданной плотностью заполнения (обычно 5 – 20 %). В зависимости от конфигурации модели и настроек слайсера, поддержки могут быть соприкасающимися с поверхностью изделия или отделенными от нее воздушным зазором (в виде «решетки» с интервалом) для облегчения последующего удаления.

Форма поддерживающей структуры в FDM-печати определяется компромиссом между механической устойчивостью, объемом расходуемого материала, качеством контактной поверхности изделия и трудоемкостью постобработки.

Расстановка поддерживающих структур напрямую связана с пространственной ориентацией ТЦЧ [15, 16]. Если угол между нормалью к полигону и вертикалью (осью Z) превышает критическое значение (обычно 30° ... 45°), то такой элемент требует установки поддерживающих конструкций. В зависимости от угла наклона ТЦЧ к рабочей области изменяются области расстановки поддержек. Неправильная пространственная ориентация требует установки поддержек, в результате чего могут возникнуть дефекты на изделии в процессе печати.

Помимо влияния на необходимость и объем поддерживающих конструкций, пространственная ориентация модели напрямую определяет ее высоту по оси Z, что в свою очередь влияет на общее время печати (количество слоев) и на распределение механической нагрузки в процессе формирования изделия. В частности, при увеличении высоты модели возрастает вес верхних слоев, который передается на нижележащие, еще не полностью остывшие слои. Это может привести к их деформации, усадке или смещению, особенно при печати тонкостенных или массивных конструкций. Чем выше изделие и чем больше его масса, тем значительнее воздействие собственного веса на нижние слои, что может негативно сказаться как на геометрической точности, так и на прочностных характеристиках готовой детали.

Третий компонент – это установка параметров печати. Входные данные: данные из библиотек принтеров и материалов, содержащие рекомендуемые настройки печати; техническое и конструкторское задание. Выходные данные: установленные параметры печати во внутреннем представлении слайсера.

Задание параметров печати осуществляется либо автоматически – при выборе оборудования и материала из встроенных библиотек слайсера, либо вручную – на основе технических требований к изделию и опыта оператора.

Наиболее значимыми параметрами, влияющими на геометрическую точность и прочностные характеристики готового изделия, являются:

- ширина экструзии (определяющая плотность и форму линии отложения материала), а также шаблон заполнения для внешних и внутренних поверхностей;
- толщина (высота) слоев, зависит от требуемой точности и технической возможности реализации, например, 0,3 и 0,125 мм [10];
- форма и плотность заполнения (процент объема внутреннего пространства ТЦЧ, заполняемого материалом); скорость печати, которая может задаваться отдельно для различных элементов: периметров, заполнения, поддержек;
- температурные режимы экструдера и рабочего стола;
- дополнительные параметры: количество периметров, скорость охлаждения и др.

Плотность заполнения (или степень заполнения внутреннего объема изделия) – один из ключевых параметров подготовки модели к печати, определяющий не только материалоемкость и время производства, но и физико-механические характеристики готового изделия. Снижение плотности заполнения приводит к уменьшению массы изделия и расхода материала, однако может вызывать ряд технологических дефектов [17, 18]. Показатель заполнения в 15 % и перекрестная структура являются наиболее стабильными для качественной печати без потери прочности, но не для всех возможных форм и требований к изделию.

Четвертым компонентом является *генерация управляющей программы*. Входные данные: данные о ТЦЧ и параметрах печати. Выходные данные: G-код. Генерация управляющей программы экструдера выполняется после окончательного преобразования ТЦЧ и задания параметров печати. При генерации применяется послойная или поверхностная технология. Необходимо проанализировать ТЦЧ на каждом слое. Дискретность слоя зависит от заданной высоты. При анализе слоя требуется найти контур от пересечения секущей плоскости с ТЦЧ [19]. С учетом этого формируемый G-код должен содержать информацию о способах создания слоев, которая, как правило, включает данные о векторных линиях, растровых плашках, путей перемещения и другие управляющие данные [20].

Финальным этапом данного компонента является экспорт данных в машинный код G-код. Он реализует преобразование сформированного в слайсере G-кода в формат, понятный принтеру, на котором должно быть выполнено построение изделия.

Подсистема «Подготовка трехмерного цифрового чертежа к печати» служит ключевым интерфейсом между цифровой моделью и физическим исполнением. Она обеспечивает технологическую адаптацию проекта под конкретное оборудование и материал, тем самым определяя качество, точность и эффективность всего процесса аддитивного производства.

Управляющими воздействиями выступают параметры нарезки (толщина слоя, плотность заполнения), а также пространственная ориентация модели, которая оказывает решающее влияние на все последующие характеристики процесса.

Подсистема «Подготовка материала и устройства печати».

Входные данные: техническое задание. Выходные данные: готовое к печати оборудование.

Подсистема выполняет функцию материально-энергетического интерфейса, обеспечивая соответствие физических условий заданным технологическим параметрам. Является преобразователем управляющего сигнала в состояние готовности оборудования.

Осуществляется выбор полимерного материала и подготовка оборудования: установка нити, калибровка механизмов, проверка температурных режимов и позиционирования платформы [20, 21].

Подсистема выполняет роль интерфейса между цифровым проектом и физическим исполнением, обеспечивая соответствие материально-технической базы заданным технологическим требованиям. Управляющими воздействиями являются выбор материала, его предварительная сушка, калибровка платформы, настройка температурных режимов.

Подсистема «Печать».

Входные данные: управляющий G-код, готовое к печати оборудование. Выходные данные: физический объект – изделие, полученное в результате аддитивного процесса формообразования.

Функцией подсистемы является реализация процесса послойного наращивания объекта на основе управляющих команд. Подсистема «Печать» рассматривается как динамическая система управления движением и тепломассопереносом, где выход зависит от точности исполнения входных команд и стабильности физических условий. Является ядром исполнительной части системы аддитивного производства и включает в себя:

- получение и интерпретацию G-кода устройством печати;
- нагрев экструдера и рабочей области до заданных температур;
- выполнение маршрутизированных команд построения изделия.

Эффективность работы определяется совокупностью факторов: механической точностью принтера, качеством материала, корректностью G-кода и условиями окружающей среды (температурой, влажностью, сквозняками). Процесс полностью автоматизирован и управляется встроенным контроллером принтера. Управляющие воздействия на этом этапе минимальны и сводятся к мониторингу и возможной коррекции в случае возникновения аварийных ситуаций.

Подсистема «Финишная обработка изделия».

Входные данные: напечатанное изделие, техническое задание. Выходные данные: готовое изделие, пригодное к использованию по назначению.

Функцией подсистемы является доводка изделия до требуемого уровня качества, соответствующего эксплуатационным, эстетическим и точностным критериям. Включает снятие изделия с платформы, удаление лишних конструкций (поддержек, подложек, при их наличии), шлифовку или плавление излишков материала, а также заполнение недостающих элементов методом плавления [22, 23].

Основным фактором, определяющим сложность и длительность этого этапа, является объем и сложность поддерживающих конструкций, а также наличие дефектов печати. Подсистема является завершающей в технологической цепочке и обеспечивает соответствие продукта конечной цели системы. В условиях мелкосерийного или индивидуального производства финишная обработка часто выполняется вручную, что делает ее трудоемкой, но критически важной для достижения приемлемого результата. Управляющими воздействиями являются выбор методов и инструментов обработки, квалификация оператора.

Рассмотренная структура системы аддитивного производства отражает иерархическую, последовательную организацию процесса от идеи до готового изделия. Все подсистемы связаны информационными, управляющими и материальными потоками, образуя замкнутый технологический цикл.

Обоснование выбора пространственной ориентации ТЦЧ как управляющего воздействия

На основании проведенного системного анализа можно сделать вывод, что система аддитивного производства методом FDM представляет собой разомкнутую динамическую систему управления, функционирующую по принципу управления по возмущению.

В рамках исследования принимается допущение о том, что влияние внешней среды (температуры, влажности, вибраций) является постоянным и не учитывает-

ся при формировании управляющего воздействия. Это позволяет сосредоточить внимание на внутренних факторах, поддающихся контролю со стороны оператора или автоматизированной системы.

Анализ выделенных подсистем показывает, что наибольшие возможности для управления эффективностью процесса без внедрения дополнительного оборудования сосредоточены на этапе подготовки ТПЧ к печати. Среди всех управляющих воздействий этого этапа особое место занимает пространственная ориентация ТПЧ. Это обосновано следующими факторами:

- выбор угла поворота одновременно влияет на время печати, расход материала, качество поверхности, точность размеров и необходимость в поддерживающих конструкциях.

- пространственная ориентация задается пользователем на этапе подготовки и не требует модификации оборудования или материалов.

- изменение ориентации на этапе подготовки не влечет за собой необратимых затрат, что позволяет проводить многократные итерации поиска оптимального решения.

- зависимость характеристик печати от угла поворота может быть описана математическими моделями, что открывает возможности для автоматизации выбора оптимальной конфигурации.

Трехмерный цифровой чертеж в формализованном описании представлен в виде геометрической модели $M = \{\text{Geometry}, \vec{R}\}$, где Geometry – совокупность топологических и метрических характеристик изделия; $\vec{R}$ – вектор пространственной ориентации модели относительно координатных осей платформы построения OX, OY, OZ соответственно.

Согласно ГОСТ 2.052–2006, пространственная ориентация изделия определяется проектировщиком при создании модели и фиксируется в ее данных. В связи с этим было принято решение о принятии пространственной ориентации, заданной пользователем при загрузке модели, как «нулевой». При этом используется декартова система координат, где плоскость XY горизонтальна (платформа построения), а ось Z отвечает за высоту.

Управляющим воздействием в системе аддитивного производства рассматривается изменение вектора пространственной ориентации $\vec{R}$, которое оказывает влияние на выходные характеристики системы без обратной связи в реальном времени. Таким образом, система функционирует по принципу управления по возмущению в разомкнутом контуре.

В качестве критериев эффективности выбраны время печати T , объем затрачиваемого материала V и точность печати K , определяемая как степень соответствия геометрии готового изделия исходному ТПЧ.

Для обеспечения сопоставимости критериев введены нормализованные величины:

$$\bar{K}(\vec{R}) = \frac{K(\vec{R}) - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}};$$

$$\bar{T}(\vec{R}) = \frac{T(\vec{R}) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}};$$

$$\bar{V}(\vec{R}) = \frac{V(\vec{R}) - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

где $\bar{K}(\vec{R}) \in [0, 1]$ (значение 1 соответствует наивысшей точности); $\bar{T}(\vec{R}), \bar{V}(\vec{R}) \in [0, 1]$ (значение 0 соответствует оптимальному – минимальному – расходу ресурсов).

Задача управления формулируется как поиск вектора $\vec{R}$, минимизирующего нормализованные показатели T, V и максимизирующего нормализованный показатель K . Пусть w_T, w_V, w_K – коэффициенты важности критериев, задаваемые ЛПР, удовлетворяющие условию нормировки

$$w_T + w_V + w_K = 1, w_i \geq 0.$$

Тогда целевая функция управления системой аддитивного производства принимает вид

$$F(R) = w_T \cdot \bar{T}(\vec{R}) + w_V \cdot \bar{V}(\vec{R}) + w_K \cdot (1 - \bar{K}(\vec{R})).$$

Ограничения задачи обусловлены физическими и технологическими пределами системы:

$$\begin{cases} H(\vec{R}) \leq Hpr; \\ W(\vec{R}) \leq Wpr; \\ L(\vec{R}) \leq Lpr; \\ T(\vec{R}) > 0; \\ V(\vec{R}) \geq V_{\text{model}}; \\ K(\vec{R}) \in [K_{\min}, K_{\max}], \end{cases}$$

где $H(R), W(R), L(R)$ – габаритные размеры модели в ориентации R ; Hpr, Wpr, Lpr – предельные размеры рабочей зоны принтера; V_{model} – объем самого изделия без поддержек.

Таким образом, задача оптимального управления формулируется следующим образом.

Найти такое значение вектора $\vec{R}^* = (R_x^*, R_y^*, R_z^*)$, при котором целевая функция $F(\vec{R}^*)$ достигает минимального значения при соблюдении заданных ограничений и учете приоритетов ЛПР, выраженных через весовые коэффициенты: $F(\vec{R}^*) \rightarrow \min$.

Заключение

Проведенный системный анализ позволил декомпозировать процесс аддитивного производства методом FDM на пять функциональных подсистем и классифицировать его как искусственную, открытую, детерминированную и централизованную систему. Выявлено, что ключевым управляющим воздействием, доступным на этапе подготовки модели, является пространственная ориентация ТЦЧ.

Результаты работы позволяют перейти к разработке моделей многокритериальной оптимизации, учитывающих компромисс между временем печати, расходом материала и точностью готового изделия. Предложенный подход обеспечивает обоснованный выбор конфигурации, что актуально для мелкосерийного производства, где каждое изделие может иметь уникальные требования к качеству и экономическим показателям.

Дальнейшие исследования направлены на разработку математических моделей зависимости характеристик печати от угла поворота, а также создание программных средств поддержки принятия решений на основе полученных моделей.

Список литературы

1. Александрович, Д. В. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования / Д. В. Александрович, С. Е. Петрович // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2(26). – С. 16–28.
2. Смирнов, М. А. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки / М. А. Смирнов, Н. О. Рыбкин, О. Л. Ксенофонтова // Сборник научных трудов вузов России «Проблемы экономики, финансов и управления производством». – 2021. – № 48. – С. 115–122.
3. Зайцев, В. Д. Дефекты, сопровождающие технологии быстрого прототипирования, и методы их устранения / В. Д. Зайцев, Н. И. Наумкин, Е. А. Кильмашкин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова, Саранск, 24–25 мая, 216 года. – Саранск, 2016. – С. 417–422.
4. Моделирование системы управления наземной робототехнической платформой для сельского хозяйства / П. В. Балабанов, А. С. Егоров, С. А. Сенкевич [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 4. – С. 564–576. doi: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.564-576
5. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6–16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016
6. Задорожная, И. Д. Виды моделирования и требования к моделям для 3D-печати / И. Д. Задорожная, И. В. Иванова // Вестник научных конференций. – 2018. – № 3-4(31). – С. 46–51.
7. Царькова, Ю. Р. Полигональная сетка в компьютерной графике / Ю. Р. Царькова, О. В. Внукова // Студенчество России: век XXI : материалы VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Орел, 03 июня, 2020 г. – Орел, 2020. – Ч. 2. – С. 394–398.
8. Абдурайимов, Л. Н. Особенности работы с 3D-моделями изделий в формате STL-файлов на программном уровне / Л. Н. Абдурайимов, Р. А. Бекиров // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. – 2017. – № 2. – С. 18–28.
9. Тлеубаев, И. С. Аналитический обзор алгоритмов совмещения данных трехмерного сканирования / И. С. Тлеубаев // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIV Международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 7–11 ноября 2016 г. – Томск, 2016. – Т. 2. – С. 231–232.
10. Ракитин, С. Ю. Формирование послойных контуров 3D-моделей для аддитивного производства / С. Ю. Ракитин, А. А. Илькубаев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 03–05 февраля 2016. – Оренбург, 2016. – С. 223–230.
11. Лисяк, В. В. Обзор слайсеров для 3D-печати / В. В. Лисяк // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2022. – № 3(227). – С. 60–74. doi: 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74
12. Скорая помощь для 3D-моделей: 10 основных функций лечения STL-файлов. – Текст электронный. – URL : <https://3dtoday.ru/blogs/iqbtech-ru/skoraya-pomoshh-dlya-3d-modelei-10-osnovnykh-funkcii-lecheniya-stl-failov> (дата обращения: 01.02.2026).

13. Зубрилин, А. В. Предпечатная подготовка 3D-моделей с использованием специализированного программного обеспечения / А. В. Зубрилин, М. В. Тагильцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 88–96.
14. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати : учебное пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург : Изд-во УГЛТУ, 2017. – 100 с.
15. Xie, Y. Support-free interior carving for 3D printing / Y. Xie, X. Chen // Visual Informatics. – 2017. – Vol. 1, No. 1. – P. 9–15. doi: 10.1016/j.visinf.2017.01.002
16. Dominguez, G. A. Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A Methodological Approach / A. G. Dominguez, J. C. Gil, M. A. Sebastián // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 9. – P. 1993. doi: 10.3390/polym12091993
17. Васильевич, С. В. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий / С. В. Васильевич, Г. А. Николаевич, Б. Д. Иванович // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018. – № 2(35). – С. 52–61.
18. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing / J. Huang, Q. Chen, H. Jiang, B. Zou, L. Li, J. Liu, H. Yu // Virtual and Physical Prototyping. – 2020. – Vol. 15, No. 2. – P. 148–162. doi: 10.1080/17452759.2019.1708027
19. Горелов, А. О. Математический аппарат анализа моделей для 3D-печати / А. О. Горелов // Научное приборостроение. – 2022. – Т. 32, № 3. – С. 104–116. doi: 10.18358/np-32-3-i104116
20. Михеенко, Д. Ю. Расходные материалы для 3D печати методом послойного наплавления (FDM/FFF) / Д. Ю. Михеенко, В. М. Михеенко // Знание. – 2016. – № 11-1(40). – С. 37–43.
21. Тараховский, А. Ю. Оптимизация выбора материалов для 3D-печати (FDM): влияние теплового расширения и механических свойств / А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей Всеросс. науч.-прак. конференции, Севастополь, 14–18 февраля 2025 г., – Севастополь, 2025. – С. 49–54.
22. The Post-Processing of Additive Manufactured Polymeric and Metallic Parts / D. Syrlybayev, A. Seisekulova, D. Talamona, A. Perveen // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – Vol. 6, No. 5. – P. 116. doi: 10.3390/jmmp6050116
23. Влияние постобработки на физико-механические свойства образцов, полученных методом FDM-печати / И. В. Гнидина, В. М. Волгин, А. П. Малахов, А. А. Потапов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 326–334. doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-326-327

System Analysis of the FDM Additive Manufacturing Process as a Basis for Formulating an Optimal Control Problem

© N. A. Vekhteva¹✉

¹ *Department of Automated Decision Support Systems, magicanloner@gmail.com;
TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: 3D printing; FDM technology; additive manufacturing; systems analysis.

Abstract: This paper presents a systems analysis of additive manufacturing, which proposes a hierarchical decomposition of the process cycle into five functional subsystems with a formalized description of information, material, and control flows.

It is shown that the system is artificial, open, and deterministic, allowing for the application of control theory methods. It was found that varying the spatial orientation of the model allows for influencing print time, material consumption, and the need for support structures without modifying the equipment. A mathematical formulation of the multi-criteria optimization problem with normalized performance indicators is proposed.

References

1. Aleksandrovich D.V., Petrovich S.E. [Classification of additive technologies and analysis of directions of their economic use], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society], 2018, no. 2(26), pp. 16-28. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Smirnov M.A., Rybkin N.O., Ksenofontova O.L. *Sbornik nauchnykh trudov vuzov Rossii "Problemy ekonomiki, finansov i upravleniya proizvodstvom"* [Collection of Scientific Works of Russian Universities "Problems of Economics, Finance and Production Management"], 2021, no. 48, pp. 115-122. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Zaytsev V.D., Naumkin N.I., Kil'myashkin E.A. *Energoeffektivnyye i resursosberegayushchiye tekhnologii i sistemy* [Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies and Systems], Saransk, 2016, pp. 417-422. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Balabanov P.V., Egorov A.S., Senkevich S.A., Mironov A.D., Bulanov V.O., Bobrov D.A. [Modeling of a control system for a ground robotic platform for agriculture], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 4, pp. 564-576. doi: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.564-576 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sannikov S.A., Mokrozub V.G., Kalistratov M.S. [Systems analysis of the design process for electrochemical and chemical treatment lines for parts], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 6-16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Zadorozhnaya I.D., Ivanova I.V. [Types of modeling and requirements for 3D printing models], *Vestnik nauchnykh konferentsiy* [Bulletin of Scientific Conferences], 2018, no. 3-4 (31), pp. 46-51. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Tsar'kova Yu.R., Vnukova O.V. *Studenchestvo Rossii: vek XXI* [Students of Russia: Century XXI], Orel, 2020, pp. 394-398. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Abdurayimov L.N., Bekirov R.A. [Features of working with 3D product models in STL file format at the software level], *Informatsionno-komp'yuternyye tekhnologii v ekonomike, obrazovanii i sotsial'noy sfere* [Information and Computer Technologies in Economics, Education and Social Sphere], 2017, no. 2, pp. 18-28. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Tleubaev I.S. *Molodezh' i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XIV Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and Modern Information Technologies: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, November 7-11, 2016, Tomsk], vol. 2, Tomsk, 2016, pp. 231-232 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Rakitin S.Yu., Il'kubaev A.A. *Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury : materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of the All-Russian scientific and methodological conference, Orenburg, February 3-5, 2016], Orenburg, 2016, pp. 223-230 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Lisyak V.V. [Review of slicers for 3D printing], *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences], 2022, no. 3(227), pp. 60-74. doi: 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/iqbtech-ru/skoraya-pomoshh-dlya-3d-modelei-10-osnovnyx-funkcii-leceniya-stl-failov> (accessed 1 February 2026).
13. Zubrilin A.V., Tagiltsev M.V. P [Pre-print preparation of 3D models using specialized software], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2017, no. 9-1, pp. 88-96. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Shkuro A.E., Krivonogov P.S. *Tekhnologii i materialy 3D-pechati: uchebnoye posobiye* [Technologies and materials of 3D printing: textbook], Yekaterinburg: UGLTU, 2017, 100 p. (In Russ.)
15. Xie Y., Chen X. Support-free interior carving for 3D printing, *Visual Informatics*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 9-15. doi: 10.1016/j.visinf.2017.01.002
16. Dominguez A.G., Gil J.C., Sebastián M.A. Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A Methodological Approach, *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 1993. doi: 10.3390/polym12091993
17. Vasil'evich S.V., Nikolaevich G.A., Ivanovich B.D. [Study of the influence of 3D printing parameters on the dimensional accuracy of products], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Vitebsk State Technological University], 2018, no. 2 (35), pp. 52-61. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Huang J., Chen Q., Jiang H., Zou B., Li L., Liu J., Yu H. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing, *Virtual and Physical Prototyping*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 148-162. doi: 10.1080/17452759.2019.1708027
19. Gorelov A.O. [Mathematical apparatus for analyzing models for 3D printing], *Nauchnoye priborostroyeniye* [Scientific Instrumentation], 2022, vol. 32, no. 3, pp. 104-116. doi: 10.18358/np-32-3-i104116 (In Russ., abstract in Eng.)
20. Mikheenko D.Yu., Mikheenko V.M. [Consumables for 3D printing by fused deposition modeling (FDM/FFF)], *Znanie* [Knowledge], 2016, no. 11-1 (40), pp. 37-43. (In Russ., abstract in Eng.)
21. Tarakhovskiy A.Yu. *Perspektivnyye tekhnologii revers-inzhiniringa i bystrogo prototipirovaniya: sbornik statey Vseross. nauch.-prak. konferentsii* [Promising technologies of reverse engineering and rapid prototyping: collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference], Sevastopol, February 14-18, 2025, Sevastopol, 2025, pp. 49-54. (In Russ., abstract in Eng.)
22. Syrlybayev D., Seisekulova A., Talamona D., Perveen A. The post-processing of additive manufactured polymeric and metallic parts, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, vol. 6, no. 5, pp. 116. doi: 10.3390/jmmp6050116
23. Gnidina I.V., Volgin V.M., Malakho A.P., Potapov A.A. [Influence of post-processing on physico-mechanical properties of samples obtained by FDM printing], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2023, no. 9, pp. 326-334. doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-326-327 (In Russ., abstract in Eng.)

Systemanalyse des additiven FDM-Fertigungsprozesses als Grundlage für die Formulierung eines optimalen Steuerungsproblems

Zusammenfassung: Es ist eine Systemanalyse der additiven Fertigung vorgestellt, die zu einer vorgeschlagenen hierarchischen Zerlegung des Prozesszyklus in fünf funktionale Teilsysteme mit einer formalisierten Beschreibung der Informations-, Material- und Kontrollflüsse führt. Das System erweist sich als künstlich, offen und deterministisch und ermöglicht somit die Anwendung von Methoden der Regelungstechnik. Es ist gezeigt, dass die Variation der räumlichen Ausrichtung des

Modells die Druckzeit, den Materialverbrauch und den Bedarf an Stützstrukturen beeinflusst, ohne die Ausrüstung zu modifizieren. Es ist eine mathematische Formulierung des multikriteriellen Optimierungsproblems mit normierten Leistungsindikatoren vorgeschlagen.

Analyse systémique du processus de la fabrication additive par la méthode fdm comme base pour l'énoncé du problème de la commande optimal

Résumé: Est présentée une analyse systémique de la production additive, il en résulte une décomposition hiérarchique du cycle technologique en cinq sous-systèmes fonctionnels avec une description formalisée des flux d'information, de matériel et de contrôle. Il est démontré que le système est artificiel, ouvert et déterministe, ce qui permet l'application des méthodes de la théorie du contrôle. Il est établi que la variation de l'orientation spatiale du modèle permet d'influer sur le temps de l'impression, la répartition du matériau et le besoin des structures du support sans la modification de l'équipement. Est proposée une définition mathématique du problème de l'optimisation multi-critères avec des indicateurs de performance normalisés.

Автор: *Вехтева Надежда Андреевна* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; младший научный сотрудник НИЛ «Лаборатория медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» управления фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

ОБ ОПТИМАЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ПРОЦЕССА В ОДНОЙ МОДЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

© Н. В. Антипина¹✉

¹ *Кафедра математических методов и цифровых технологий,
natant2012@mail.ru; ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет»,
Иркутск, Российская Федерация*

Ключевые слова: динамические модели; достаточные условия оптимальности; импульсное управление; квазивариационное неравенство; разрывные траектории; системный анализ.

Аннотация: Исследована прикладная модель экономической динамики, которая формализуется как задача оптимального управления с линейным полуограниченным управлением. Основная сложность анализа подобных моделей связана с нарушением условий регулярности, что приводит к необходимости привлечения специализированного математического аппарата. Показан системный подход к верификации оптимальности в импульсных процессах, основанный на синтезе обобщенного принципа максимума и достаточных условий, базирующихся на построении разрывных решений – функций Ляпунова–Кротова. Доказана оптимальность найденной импульсной экстремали в классической одномерной модели управления рекламным бюджетом. Обоснована оптимальность стратегии «импульс – магистральный период – прекращение финансирования» для широкого класса экономических систем с неограниченными управляющими воздействиями в короткие периоды времени.

Введение

Задачи динамической оптимизации, описывающие процессы управления в экономике, часто не содержат ограничения на управляющие эндогенные переменные в рамках конечных временных интервалов. Одним из таких примеров являются задачи распределения инвестиций в рекламу, где темпы финансирования формально не ограничены сверху. Такого типа задачи линейны по управляющим переменным, удовлетворяющим конусным ограничениям. В силу отсутствия ограничений на управление, они трактуются как неразрешимые в классической теории управления и относятся к классу нерегулярных задач оптимального управления [1, 2]. Естественный путь их исследования – это расширение до импульсной постановки задачи с управлениями в виде векторных мер (импульсных управлений) и разрывными траекториями ограниченной вариации [1, 3 – 5] или переход к рассмотрению на множестве допустимых последовательностей.

Направление развития теории достаточных условий оптимальности импульсных процессов продолжает быть актуальным уже в течение нескольких десятилетий [6 – 10], поскольку позволяет провести проверку найденных с помощью необходимых условий экстремалей и доказать их оптимальность. Применение достаточных условий, полученных на основе методов динамического программирования и уравнении Беллмана, для задач с разрывными траекториями

напрямую невозможно [2 – 4]. В этом контексте плодотворным оказался подход, основанный на построении специальных функций – аналогов функций Ляпунова–Кротова, удовлетворяющих квазивариационным неравенствам [9 – 11]. Для импульсных систем ключевой особенностью становится необходимость работы с разрывными решениями таких неравенств, что связано с условиями скачка фазовых и сопряженных переменных [1, 4, 12, 13]. Состояние вопроса характеризуется поиском конструктивных методов построения этих функций, особенно для задач с нарушением условия корректности Фробениуса [4], в частности, для экономических прикладных моделей с неограниченным управлением [3 – 5, 14, 15].

Цель работы – прикладная иллюстрация эффективности использования системного подхода к анализу содержательной экономической модели, а также выявление и преодоление характерных для этой модели проблем исследования.

В статье поставлены и решены следующие задачи:

– анонсированы достаточные условия оптимальности, основанные на построении семейства разрывных решений квазивариационного неравенства – обобщения метода функций Ляпунова–Кротова [9 – 11];

– детально построено разрешающее семейство функций для конкретной прикладной модели экономической динамики (модели управления рекламным бюджетом) и строго доказана оптимальность найденной ранее импульсной экстремали, включая анализ случая нарушения условия корректности.

1. Квазивариационные неравенства и методика построения их решений

Рассмотрим динамическую систему

$$\dot{x} = f(t, x, u); \quad u(t) \in U, \quad (1)$$

где функция f непрерывна по всем своим аргументам, $U \subseteq R^m$ – произвольное множество пространства R^m .

Допустимым процессом системы (1) называется пара функций $\sigma = (x(t), u(t) | t \in \Delta)$, удовлетворяющих условиям:

1) траектория $x(t)$ и управление $u(t)$ определены на отрезке времени $\Delta = [t_0, t_1]$;

2) траектория $x(t)$ является абсолютно непрерывной функцией;

3) управление $u(t) \in U$ – измеримая ограниченная функция;

4) пара σ удовлетворяет на отрезке Δ системе (1).

Квазивариационным неравенством для системы (1) назовем следующее неравенство в частных производных [9]:

$$P^0(t, x, u) := \varphi_t + \langle \varphi_x, f(t, x, u) \rangle \leq 0, \quad (t, x) \in Q, \quad u \in U, \quad (2)$$

где $Q \subset R^1 \times R^{d(x)}$ – открытое множество расширенного фазового пространства.

Решением неравенства (2) назовем дифференцируемую, липшицевую функцию $\varphi(t, x)$, не возрастающую вдоль любой траектории $x(t)$ системы (1) на Q [9].

Введем в рассмотрение классическую терминальную задачу:

$$\begin{aligned} J(\sigma) &:= l_0(b) \rightarrow \min, \quad b := (t_0, x_0; t_1, x_1) \\ b &\in C \subset R \times R^{d(x)} \times R \times R^{d(x)} \\ (t, x(t)) &\in Q. \end{aligned} \quad (3)$$

Следующая теорема дает достаточные условия оптимальности экстремалей в задаче (3) и обобщает классические условия В. Ф. Кротова [2] на класс вырожденных задач.

Теорема 1 ([9]). Пусть имеется семейство $\{\varphi^a \mid a \in A\}$ решений квазивариационного неравенства на открытом множестве $Q \subset R^1 \times R^{d(x)}$ и $\bar{\sigma} = (\bar{x}(t), \bar{u}(t) \mid t \in [\bar{t}_0, \bar{t}_1])$ является допустимым процессом в задаче (3) с траекторией в Q .

Если $\bar{b} = (\bar{t}_0, \bar{x}(\bar{t}_0), \bar{t}_1, \bar{x}(\bar{t}_1))$ доставляет глобальный минимум в задаче:

$$\begin{aligned} I_0(b) &\rightarrow \inf, \quad b \in C, \\ \varphi^a(t_1, x_1) - \varphi^a(t_0, x_0) &\leq 0 \quad \forall a \in A, \\ b &:= (t_0, x_0, t_1, x_1) \in Q \times Q, \end{aligned} \quad (4)$$

то процесс $\bar{\sigma}$ оптимален в задаче (3) и доставляет сильный минимум в задаче (1).

Семейство функций Ляпунова–Кротова φ^a , удовлетворяющее условиям теоремы 1, называется *разрешающим*.

Далее сосредоточимся на задаче импульсного управления (линейной по управлению, с ограничением на него в виде конуса U):

$$\dot{x} = f_0(t, x) + G(t, x)u, \quad u(t) \in U. \quad (5)$$

Выполнение условия корректности Фробениуса [4] гарантирует существование единственной импульсной траектории в задаче (5), тогда как его нарушение дает воронку импульсных траекторий.

Введем функцию $H_0(t, x, \psi_x) = \langle \psi_x, f_0(t, x) \rangle$. Для задачи (5) квазивариационное неравенство принимает вид:

$$\varphi_t + H_0(t, x, \psi_x) \leq 0; \quad (6)$$

$$G^*(t, x) \varphi_x \in U^- \quad \text{на } Q, \quad (7)$$

где U^- – отрицательно двойственный конус к U , то есть $U^- = \{l \mid \langle l, U \rangle \leq 0\}$. Это весьма специфическая система в частных производных, совместность которой не гарантируется.

Систему (7) называют *системой кратных максимумов* [1, 2]. Ее условие совместности заключается в том, что она *допускает пополнение* [1].

Особенностью задач импульсного управления является разрывность траекторий и сопряженных переменных в моменты приложения импульсов. Этим объясняется использование разрывных функций Ляпунова–Кротова для доказательства оптимальности их допустимых процессов. Конструктивно эти функции строят как склейку гладких решений $\varphi_1(t, x), \dots, \varphi_N(t, x)$, определенных на цилиндрических множествах

$$Q_1 = (a, s_1] \times \Omega_1, \dots, Q_i = [s_{i-1}, s_i] \times \Omega_i, \dots, Q_N = [s_{N-1}, b) \times \Omega_N,$$

соответствующих этапам непрерывного движения и моментам скачка, где:

$$a < \bar{t}_0, \quad b > \bar{t}_1, \quad \Omega_i \subseteq R^{d(x)}.$$

Следовательно, структура решений неравенства (3) определяется формулой

$$\varphi(t, x) = \sum_{i=1}^N \chi_{Q_i}(t, x) \varphi_i(t, x), \quad (8)$$

где φ_i – решения (6), (7); $\chi_{Q_i}(t, x)$ – характеристическая функция множества Q_i , $i = \overline{1, N}$.

Методика построения φ_i такова:

- на интервалах особенности ($u_j(t) > 0$, $j = \overline{1, m}$) градиент φ_x должен обнулять соответствующие множители $\langle \varphi_x, g_j \rangle = 0$, что приводит к системе кратных максимумов. Оставшийся произвол используется для удовлетворения неравенства (6);
- на не особых интервалах ($u_j(t) = 0$, $j = \overline{1, m}$) используется «укороченное» уравнение Гамильтона–Якоби

$$\varphi_t + H_0(t, x, \varphi_x) = 0. \quad (9)$$

Его решение должно удовлетворять системе (7).

Итак, методика построения разрывных решений квазивариационного неравенства описана и может быть успешно использована для доказательства оптимальности решений одномерных и некоторых многомерных задач. Таким же путем докажем оптимальность экстремального процесса в модели управления рекламными инвестициями. Следует отметить, что задача оптимального управления, соответствующая рассматриваемой модели, не обладает свойством корректности. Однако на помощь приходит тот факт, что построенная на ее основе система кратных максимумов (7) допускает пополнение. Оптимальность экстремального процесса в этой задаче устанавливается только с применением решения квазивариационного неравенства.

2. Исследование импульсной экстремали в прикладной модели экономической динамики

Эффективность достаточных условий, представленных в п. 1, покажем на основе модели оптимизации рекламного бюджета [15]:

$$\begin{aligned} J &= -y(T) \rightarrow \inf; \\ \dot{x} &= -bx + au(1-x), \quad x(0) = x_0; \\ \dot{y} &= e^{-rt}(px - u), \quad y(0) = 0; \\ \dot{z} &= u, \quad z(0) = 0, \quad u \geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где параметры модели положительны ($a, b, p, r, x_0 > 0$), $[0, T]$ – фиксированный отрезок.

Математически модель (10) классифицируется как задача оптимального импульсного управления, поскольку управляющая переменная u не ограничена сверху ($u \geq 0$).

С результатом применения необходимых условий экстремума [4] к задаче (10) можно ознакомиться в работе [15]: найден экстремальный импульсный процесс:

$$\bar{x}(t) = \begin{cases} x_0, & t = 0, \\ x^*, & t \in (0, \tau], \\ x^* e^{b(\tau-t)}, & t \in (\tau, T], \end{cases} \quad (11)$$

$$\bar{y}(t) = \begin{cases} 0, & t = 0, \\ \frac{u^* - px^*}{r} (e^{-rt} - 1) - c, & t \in (0, \tau], \\ \frac{px^*}{b+r} (e^{-r\tau} - e^{b\tau - (b+r)t}) + \frac{u^* - px^*}{r} (e^{-rt} - 1) - c, & t \in (\tau, T], \end{cases} \quad (12)$$

$$\bar{u} = c\delta(t) + u^* \chi(0, \tau]. \quad (13)$$

Здесь x^*, u^* – значения первой компоненты фазовой траектории и управления на особом промежутке $(0, \tau]$, τ – момент переключения управления u ; c – величина импульса управления:

$$x^* = 1 - \frac{r + \sqrt{r^2 - 4abp}}{2ap}; \quad u^* = \frac{bx^*}{a(1-x^*)}; \quad (14)$$

$$\tau = T + \frac{1}{b+r} \ln \left(1 - \frac{b+r}{ap(1-x^*)} \right); \quad c = \frac{1}{a} \ln \frac{1-x_0}{1-x^*}.$$

Отметим важность выполнения условия $x_0 < x^*$, обеспечивающего существование экстремали (11) – (13).

Экономическая интерпретация данной экстремали такова: начальный импульсный «вклад» в рекламу резко увеличивает исходную долю рынка x_0 до магистрального уровня x^* , который поддерживается далее в течение периода времени $(0, \tau]$ постоянным вложением в рекламу u^* , и снижается за счет прекращения рекламы после момента τ .

Докажем с помощью квазивариационного неравенства, что экстремальный процесс (11) – (13) является оптимальным в задаче (10). Согласно теореме 1 п. 1, необходимо найти решения квазивариационного неравенства и с их помощью решить конечную задачу (5).

Начнем с решения неравенства (6), (7). На основе гамильтониана [4, 9] задачи (10)

$$H(t, x, y, \psi) = \begin{cases} -bx\psi_x + pxe^{-rt}\psi_y, & \text{если } -a(1-x)\psi_x - e^{-rt}\psi_y \leq 0; \\ +\infty, & \text{если } -a(1-x)\psi_x - e^{-rt}\psi_y > 0, \end{cases}$$

выпишем квазивариационное неравенство:

$$P^0(t, x, y) = \varphi_t - bx\varphi_x + pxe^{-rt}\varphi_y \leq 0; \quad (15)$$

$$a(1-x)\varphi_x - e^{-rt}\varphi_y \leq 0. \quad (16)$$

Наличие точки переключения управления исследуемой экстремали (11) – (13) дает право искать решение неравенства (15), (16) в виде разрывной функции:

$$\Phi(t, x, y) = \begin{cases} \varphi^1(t, x, y), & t \in (0, \tau]; \\ \varphi^2(t, x, y), & t \in (0, T]. \end{cases}$$

Таким образом, на особом интервале $(0, \tau]$ функцию

$$\varphi_1(t, x, y) = y - \frac{e^{-rt}}{a} \ln(1-x) + \frac{\theta(x^*)}{ar} (e^{-rt} - 1), \quad (17)$$

где $\theta(x) = apx + r \ln(1-x) - \frac{bx}{1-x}$, найдем методом кратных максимумов как решение уравнения

$$a(1-x)\varphi_x - e^{-rt}\varphi_y = 0.$$

Затем проведем ее нормировку, максимизируя функцию $\theta(x)$ при $x \in (0;1)$.

На не особом интервале $(\tau, T]$ выберем линейную функцию $\varphi^2(t, x, y)$, которая порождается коэкстремалью исследуемой экстремали,

$$\varphi^2(t, x, y) = y + \frac{P}{b+r} (e^{-rt} - e^{bt-(b+r)T})x. \quad (18)$$

Непосредственная проверка подтверждает, что обе функции (17) и (18) удовлетворяют квазивариационному неравенству (15), (16).

Далее перейдем к рассмотрению концевой задачи (4). Конкретизируем ее вид, учитывая найденные функции Ляпунова–Кротова φ^1, φ^2 :

$$\begin{aligned} -y(T) &\rightarrow \inf; \\ y(\tau) &\leq \frac{1}{a} \left[e^{-r\tau} \ln(1-x(\tau)) - \ln(1-x_0) + \frac{\theta(x^*)}{r} (1 - e^{-r\tau}) \right]; \\ y(T) &\leq \frac{P}{b+r} [e^{-r\tau} - e^{b\tau-(b+r)T}] x(\tau) + y(\tau). \end{aligned} \quad (19)$$

Для решения задачи (19) используем метод Лагранжа [2]. Ее решение является глобальным экстремумом, поскольку ограничения-неравенства выпуклы по $x(\tau), y(\tau), y(T)$.

Необходимые условия экстремума лагранжиана примут вид следующей системы:

$$L'_\tau = 0; \quad L'_{x(\tau)} = 0; \quad L'_{x(T)} = 0; \quad L'_{y(T)} = 0,$$

решениями которой являются:

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= T + \frac{1}{b+r} \ln \left(1 - \frac{b+r}{ap(1-x^*)} \right), \quad \bar{x}(\bar{\tau}) = x^*; \\ \bar{y}(\bar{\tau}) &= \frac{u^* - px^*}{r} (e^{-r\tau} - 1) - \frac{1}{a} \ln \frac{1-x_0}{1-x^*}; \\ \bar{y}(T) &= \frac{px^*}{b+r} (e^{-r\tau} - e^{b\tau-(b+r)T}) + \bar{y}(\bar{\tau}), \end{aligned}$$

где x^* и u^* определяются формулами (14).

Таким образом, по теореме 1 доказана оптимальность исследуемой импульсной экстремали (11) – (13).

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует эффективность комбинированного подхода к решению нерегулярных задач, являющихся математическими моделями экономики. На основе полученных результатов можно сформулировать следующие выводы:

- нарушение условия корректности – не просто техническая трудность, а содержательная особенность, приводящая к необходимости перехода к рассмотрению задач импульсного оптимального управления;

- используемая в статье методика построения разрывных решений квазивариационного неравенства (6), (7) эффективна для доказательства достаточных условий оптимальности в импульсных задачах, в том числе при отсутствии свойства корректности;

- на примере модели управления рекламным бюджетом строго доказана оптимальность импульсной экстремали, соответствующей стратегии с начальным скачкообразным вложением, последующим магистральным развитием и прекращением финансирования. Ключевую роль в доказательстве сыграло пополнение системы кратных максимумов, позволившее построить нужное семейство функций.

На основе проведенного анализа предлагаются рекомендации для дальнейших исследований. Разработанный подход рекомендуется применять для анализа и верификации оптимальности в других экономических моделях с концентрированными (импульсными) управлениями, таких как задачи оптимальных инвестиций, управления запасами или реструктуризации долга. Перспективным направлением является обобщение методики на многомерные импульсные задачи, где построение разрешающего семейства функций сопряжено с анализом более сложных систем уравнений в частных производных. Для практической реализации метода в сложных моделях целесообразно разрабатывать численные алгоритмы аппроксимации решений квазивариационного неравенства или системы кратных максимумов.

Полученные результаты могут быть применены для анализа широкого круга моделей в маркетинге, управлении инвестициями и других областях экономики, где управляющие воздействия носят концентрированный, «импульсный» характер.

Список литературы

1. Гурман, В. И. Принцип расширения в задачи оптимального управления / В. И. Гурман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Физматлит, 1997. – 287 с.
2. Кротов, В. Ф. Методы и задачи оптимального управления / В. Ф. Кротов, В. И. Гурман. – Москва : Наука, 1973. – 446 с.
3. Миллер, Б. М. Оптимизация динамических систем с импульсными управлениями и ударными воздействиями / Б. М. Миллер, Е. Я. Рубинович. – Москва : ЛЕНАНД, 2019. – 736 с.
4. Дыхта, В. А. Оптимальное импульсное управление с приложениями / В. А. Дыхта, О. Н. Самсонюк. – Москва : Физматлит, 2000. 255 с.
5. Göllmann, L. Theory and Applications of Optimal Control Problems with Multiple Impulses / L. Göllmann, H. Maurer // Journal of Industrial and Management Optimization. – 2014. – Vol. 10, No. 2. – P. 419–438. doi: 10.3934/jimo.2014.10.413
6. Доронин, С. В. Модель ударного импульса при трамбовании угольной загрузки для производства кокса / С. В. Доронин, Р. В. Зеленов, Е. М. Рейзмунт, А. П. Черняев // System Analysis & Mathematical Modeling. – 2023. – Т. 5, № 4. – С. 392–408. doi: 10.17150/2713-1734.2023.5(4).392-408
7. Завалищин, С. Т. Импульсные процессы: модели и приложения / С. Т. Завалищин, А. Н. Сесекин. – Москва : Наука, 1991. – 256 с.

8. Марчук, Р. А. Всплески геомагнитных пульсаций во время событий стационарной магнитосферной конвекции / Р. А. Марчук // *System Analysis & Mathematical Modeling*. – 2025. – Т. 7, № 1. – С.124–133. doi: 10.17150/2713-1734.2025.7(1).124-133
9. Дыхта, В. А. Неравенство Ляпунова–Кротова и достаточные условия в оптимальном управлении / В. А. Дыхта // *Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры*. – 2006. – Т. 110. – С. 76–108.
10. Кротов, В. Ф. Достаточные условия оптимальности для дискретных управляемых систем // *Доклады АН СССР*. –1967. – Т. 172, № 1. – С. 18–21.
11. Бенсусан, А. Импульсное управление и квазивариационные неравенства : пер. с фран. / А. Бенсусан, Ж.-Л. Лионс . – Москва : Наука, 1987. – 596 с.
12. Arutyunov, A. Linear impulsive control problems / A. Arutyunov, D. Karamzin, F. Lobo Pereira // *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. – 2019. – Т. 477. – С. 1–18.
13. Ащепков, Л. Т. Оптимальное управление разрывными системами / Л. Т. Ащепков ; отв. ред. Р. Ф. Габасов. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1987. – 225 с.
14. Dorroh, J. R. A Multistate, Multicontrol Problem with Unbounded Controls / J. R. Dorroh, G. A. Ferreira // *SIAM Journal on Control and Optimization*. – 1994. – Vol. 32, No. 5. – P. 1322–1331.
15. Sethi, S. P. *Optimal Control Theory. Applications to Management Science and Economics* / S. P. Sethi, G. L. Thomson. – Springer US, 2006. – 536 p.

References

1. Gurman V.I. *Princip rasshirenija v zadachi optimal'nogo upravlenija* [The principle of expansion into optimal control problems], Moscow, Fizmatlit, 1997, 287 p. (In Russ.)
2. Krotov V.F., Gurman V.I. *Metody i zadachi optimal'nogo upravlenija* [Methods and problems of optimal management], Moscow, Nauka, 1973, 448 p. (In Russ.)
3. Miller B.M., Rubinovich E. YA. *Optimizaciya dinamicheskikh sistem s impul'snymi upravleniyami i udarnymi vozdeystviyami* [Optimization of dynamic systems with impulsive controls and shock effects], Moscow, LENAND, 2019, 736 p. (In Russ.)
4. Dykhta V.A., Samsonyuk O.N. *Optimal'noye impul'snoye upravleniye s prilozheniyami* [Optimal Impulse Control with Applications], Moscow: Fizmatlit, 2000, 255 p. (In Russ.)
5. Göllmann L., Maurer H. Theory and Applications of Optimal Control Problems with Multiple Impulses. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 2014, vol.10, no. 2, pp. 413–441. doi: 10.3934/jimo.2014.10.413
6. Doronin S.V., Zelenov R.V., Rejzmunt E.M., Chernyaev A.P. [Impact pulse model for compacting coal loading for coke production]. *Sistemnyj analiz i matematicheskoe modelirovanie* [System Analysis & Mathematical Modeling], 2023, vol. 5, no. 4, pp. 392-408. doi: 10.17150/2713-1734.2023.5(4).392-408 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Zavalishchin S.T., Sesekin A.N. *Impul'snye processy: modeli i prilozheniya* [Impulsive processes: models and applications]. Moscow, Nauka, 1991, 256 p. (In Russ.)
8. Marchuk R.A. [Bursts of geomagnetic pulsations during stationary magnetospheric convection events], *Sistemnyj analiz i matematicheskoe modelirovanie* [System Analysis & Mathematical Modeling], 2025, vol. 7, no. 1, pp. 124-133. doi:10.17150/2713-1734.2025.7(1).124-133 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Dyhta V.A. [Lyapunov-Krotov inequality and sufficient conditions for optimal management]. *Itogi nauki i tehniki. Sovremennaja matematika i ee prilozhenija* [Results of science and technology Modern math. and its applications], 2006, vol. 110, pp. 76-108. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Krotov V.F. [Sufficient optimality conditions for discrete control systems]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1967, vol. 172, no 1, pp. 18-21. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Bensusan A., Lions ZH.-L. *Impul'snoe upravlenie i kvazivariacionnye neravenstva* [Impulsive control and quasi-variational inequalities], Moscow, Nauka, 1987, 596 p. (In Russ.)
12. Arutyunov A., Karamzin D., Lobo Pereira F. Linear impulsive control problems, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2019, vol. 477, pp. 1-18.
13. Ashhepkov L.T. *Optimal'noe upravlenie razryvnymi sistemami* [Optimal management of discontinuous systems], Novosibirsk: Nauka, 1987, 226 p. (In Russ.)
14. Dorroh J.R., Ferreira G.A. A Multistate, Multicontrol Problem with Unbounded Controls, *SIAM Journal on Control and Optimization*, 1994, vol. 32, no. 5, pp. 1322-1331.
15. Sethi S.P., Thomson G.L. *Optimal Control Theory. Applications to Management Science and Economics*, Springer US, 2006, 536 p.
-

On Impulse Process Optimality in One Model of Economic Dynamics

© N. V. Antipina¹✉

¹ *Department of Mathematical Methods and Digital Technologies,
natant2012@mail.ru; Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation*

Keywords: dynamic models; sufficient optimality conditions; impulse control; quasi-variational inequality; discontinuous trajectories; systems analysis.

Abstract: This paper examines an applied model of economic dynamics, formalized as an optimal control problem with linear semi-bounded control. The main difficulty in analyzing such models is related to the violation of regularity conditions, which necessitates the use of specialized mathematical apparatus. A systematic approach to verifying optimality in impulse processes is demonstrated. It is based on the synthesis of a generalized maximum principle and sufficient conditions based on the construction of discontinuous solutions – the Lyapunov–Krotov functions. The optimality of the resulting impulse extremal is proven in a classical one-dimensional advertising budget management model. The optimality of the “impulse – main period – funding termination” strategy is substantiated for a wide class of economic systems with unlimited control actions over short periods of time.

Zur Optimalität des Impulsprozesses in einem Modell der Wirtschaftsdynamik

Zusammenfassung: Diese Arbeit untersucht ein angewandtes Modell ökonomischer Dynamik, die als optimales Steuerungsproblem mit linearer halbbegrenzter Steuerung formalisiert wird. Die Hauptschwierigkeit bei der Analyse solcher Modelle liegt in der Verletzung von Regularitätsbedingungen, was den Einsatz spezialisierter mathematischer Methoden erforderlich macht. Es ist ein systematischer

Ansatz zur Überprüfung der Optimalität in Impulsprozessen vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf der Synthese eines verallgemeinerten Maximumprinzips und hinreichenden Bedingungen, die auf der Konstruktion diskontinuierlicher Lösungen – Lyapunov-Krotov-Funktionen – beruhen. Die Optimalität des resultierenden Impulsextrimals ist in einem klassischen eindimensionalen Werbebudgetmanagementmodell bewiesen. Die Optimalität der Strategie „Impuls – Hauptperiode – Beendigung der Finanzierung“ ist für eine breite Klasse ökonomischer Systeme mit unbegrenzten Steuerungsmaßnahmen in kurzen Zeiträumen begründet.

Sur l'optimalité du processus impulsif dans un modèle de la dynamique économique

Résumé: Est étudié un modèle appliqué de la dynamique économique, qui est formalisé comme un problème de la gestion optimale avec une commande semi-limitée linéaire. La principale difficulté de l'analyse de ces modèles est liée à la violation des conditions de régularité, ce qui conduit à la nécessité de faire appel à un appareil mathématique spécialisé. Est montrée une approche systémique à la vérification de l'optimalité dans les processus impulsifs, basée sur la synthèse du principe généralisé du maximum et des conditions suffisantes, basée sur la construction de solutions discontinues - fonctions de Lyapunov – Krotov. Est prouvée l'optimalité de l'extrême impulsion trouvée dans le modèle unidimensionnel classique de la gestion du budget publicitaire. Est justifiée l'optimalité de la stratégie «impulsion - période principale – fin de financement» pour une large classe de systèmes économiques avec des influences de contrôle illimitées sur de courtes périodes.

Автор: *Антипина Наталья Валерьевна* – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математических методов и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет», Иркутск, Российская Федерация.

UNMANNED VEHICLE GROUPS MOTION CONTROL METHODOLOGY

© M. I. Beskhmel'nov¹✉

¹ *Department of Informatics, m_beskhmel'nov@mail.ru;
MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation*

Keywords: adaptive control; artificial intelligence; autonomous navigation; collision avoidance; decentralized architecture; mobile object control; trajectory planning.

Abstract: This study addresses autonomous mobile object control complex problem within dynamically changing environments. In order to enhance system autonomy and coordinated functioning, decentralized control algorithm is developed. The methodology integrates artificial potential fields, adaptive automata, and swarm intelligence principles inspired by social organisms like ants and bees. The system ensures precise trajectory tracking and effective collision avoidance during operations, relying primarily on local information exchange. For the sake of control stability and robustness, communication overhead is significantly reduced, minimizing dependence on centralized nodes. The control process involves data collection, environment diagnostics, model formation, and strategy selection using wave and ant colony optimization algorithms. Experimental validation was conducted in a comprehensive 3D simulator utilizing multi-rotor objects.

Introduction

Mobile object control is classified as a complex task. High system autonomy and components coordinated functioning are required to accomplish mission objectives. The central challenges include data synchronization, resource allocation, collision avoidance, and adaptation to a dynamically changing environment.

Control systems are based on control theory principles, machine learning, and artificial intelligence. Decentralized architectures are employed. Individual agents make decisions based on local information. Fault tolerance is ensured, and dependence on a centralized node is minimized. In the defense sector, such systems operate as standard. Technical systems integrated with artificial intelligence perform reconnaissance and combat tasks. Adaptation to operational conditions occurs without direct operator intervention.

Route planning and navigation utilize methods of virtual waypoints, artificial potential fields, and GIS technologies. Terrain and obstacle data are integrated. These approaches model system behavior, ensuring safe obstacle avoidance and maintenance of specified motion parameters. The development of artificial intelligence applications focuses on automating the coordination of agents. Such applications are required for monitoring extended objects and conducting disaster response operations. Research in the field of control is based on social organisms' behavior models (ants, bees). Algorithms are founded on swarm and flocking principles. Strategies assume agents' homogeneity and local interaction. Approaches may incorporate hierarchy or leadership. These research directions aim to ensure coordinated movement, fault tolerance, and self-organization capability.

Related work

Mobile objects autonomous control in dynamic environments remains a challenging research area at the intersection of robotics, control theory, and artificial intelligence [1, 2]. Traditional centralized architectures, while providing global optimization capabilities, exhibit critical vulnerabilities including single points of failure, scalability limitations, and high bandwidth requirements [3]. These constraints have driven decentralized control paradigms development, where agents operate based on local information and limited peer-to-peer communication, enhancing system robustness and adaptability [4].

Trajectory planning constitutes autonomous navigation core component. Artificial potential fields (APF), model navigation as a gradient descent problem in a virtual force field, offering computational efficiency for real-time obstacle avoidance [5]. However, classical APF approaches are prone to local minima and oscillatory behavior in complex environments. Wave front algorithms provide complete path planning with guaranteed convergence but require prior environmental mapping. Hybrid approaches combining global planners with local reactive methods have emerged as practical solutions for dynamic scenarios [6].

Bio-inspired coordination strategies have gained significant attention for decentralized multi-agent systems. Swarm intelligence algorithms, including ant colony optimization (ACO) and particle swarm optimization (PSO), advantage simple local interaction rules to achieve complex collective behaviors [7]. These methods demonstrate inherent fault tolerance and scalability, making them suitable for applications with communication constraints. Recent studies integrate swarm principles with model predictive control to balance exploration and exploitation in uncertain environments [8]. Machine learning techniques, particularly deep reinforcement learning (DRL), have enabled adaptive policy learning for autonomous agents operating in partially observable environments. However, DRL approaches often require extensive training data and computational resources, limiting their deployment in resource-constrained platforms [9, 10]. Transfer learning and sim-to-real techniques are being explored to bridge this gap.

Communication efficiency represents a critical design consideration for decentralized systems. Event-triggered communication protocols reduce bandwidth usage by transmitting data only when state deviations exceed predefined thresholds. Consensus algorithms enable coordinated decision-making with minimal message exchange, though convergence guarantees depend on network topology and delay characteristics. Despite substantial progress, several challenges persist: integrating precise trajectory tracking with reactive collision avoidance under communication constraints; ensuring stability and performance guarantees for fully decentralized architectures; enabling rapid adaptation to unforeseen environmental changes without extensive retraining [11, 12]. This work addresses these gaps through a novel decentralized algorithm that combines artificial potential fields with adaptive automata, emphasizing low communication overhead, local decision-making, and robust trajectory maintenance.

Materials and Methods

In this work, a decentralized control algorithm has been developed. The algorithm ensures mobile object movement along a specified trajectory by maintaining state parameters. The approach meets the requirements of full autonomy and low communication overhead. Its application is promising in conditions of limited connectivity and a dynamic environment. Motion organization requires precise trajectory calculation, environmental parameters consideration and responsive

adaptation to changing conditions. Control principles include system actions coordination, ensuring safe movement, and achieving objectives with collision risk acceptable level. For control implementation, the role of each element is defined, communication protocols are specified, and interaction procedures are established. The control elements encompass support for data exchange, adaptation to flight conditions, and tactical interaction organization. Figure 1 illustrates the primary trajectories used for mobile object movement.

To ensure accurate following of the specified route, optimal control and efficient mobile object’s movement in the mission area, it is necessary to observe the specified trajectory parameters. In space or on a plane, the trajectory is a necessary configuration for the placement and movement of the object. The formulation of the control task may vary depending on the target route method setting. To achieve a specific geometric shape of the trajectory, the mobile object control system performs motion correction, striving for the specified target state. During the task execution, the object is required to maintain the specified trajectory, where all systems work in harmony to achieve the goal.

The application of machine learning algorithms and artificial intelligence methods determines mobile object control systems functionality. These technologies provide movement strategies autonomous correction when environmental conditions change motion control.

In the simplest case, the target trajectory is specified via mobile object coordinates target positions. Methods for constructing planar and spatial routes for mobile objects are considered in several contemporary national and foreign works. Formation of motion trajectories implies constant accounting of coordinates in the working space. Artificial potential fields allow specifying trajectories implicitly by creating a continuous force field that directs the object to the target point, simultaneously preventing collisions with obstacles [9]. Presented trajectories of mobile object movement comprise the following:

1. Building a formalized model of the operational area, including obstacle mapping, coordinate system definition, and constraint specification, which serves as the basis for all further motion planning steps (Fig. 2).

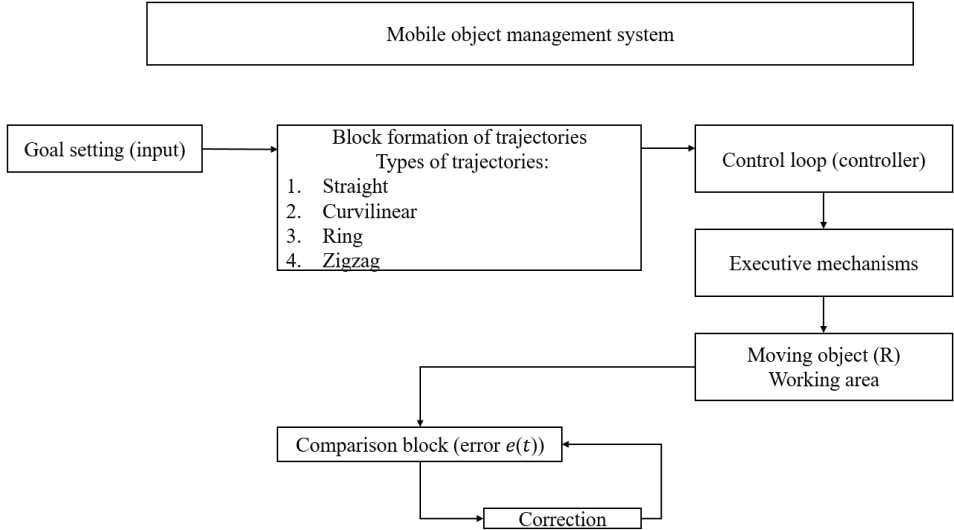


Fig. 1. Functional diagram of a single moving object control system with a module for generating basic movement trajectories

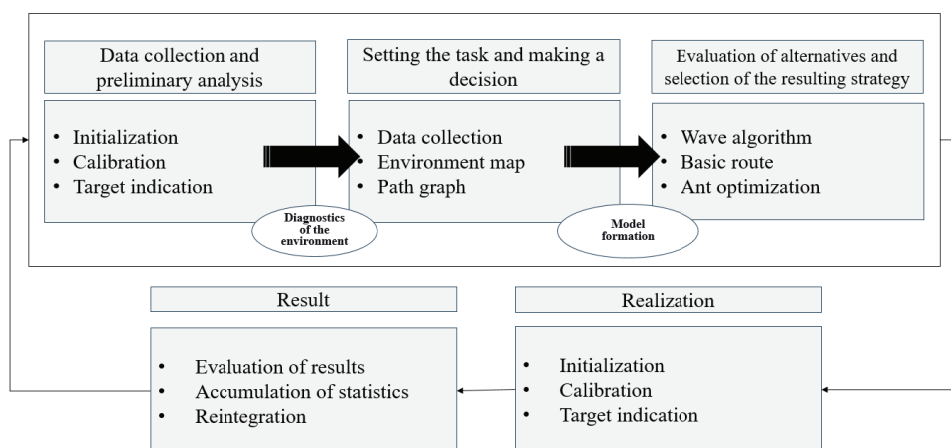


Fig. 2. Methodology for building a model of the study area

2. Object movement along a specified line, during which the control system performs tracking of the reference trajectory. The object is allowed to stop and restart the motion process due to changes in the external environment. The system continues operation during malfunction of individual systems.

3. Object movement relative to the baseline during terrain monitoring (Fig. 3, 4).

Implementation of the listed motion modes requires control algorithms formalization [10]. The developed methodology includes trajectories' mathematical description and synthesis of controllers to ensure specified motion quality.

Approaches to motion control utilize concepts of virtual points and target references [13]. The method relies on the object following an assigned point. Point coordinates vary according to a rule and are computed by the control system. Parameters serve as input data for the controller. The control system determines the target point within the working space. The object receives point coordinates and motion trajectory. Implementation assumes movement in Euclidean space with quantized time intervals. Control involves operator participation. Tasks include defining motion routes and monitoring task execution [14]. Ensuring motion safety and responding to unforeseen situations are required. Process organization requires actions coordination between the system and the operator. Decision-making ensures mission efficiency.

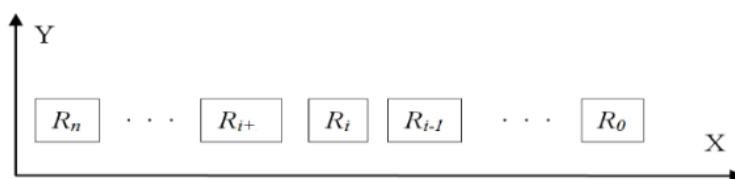


Fig. 3. Mobile object deployed in a line movement scheme

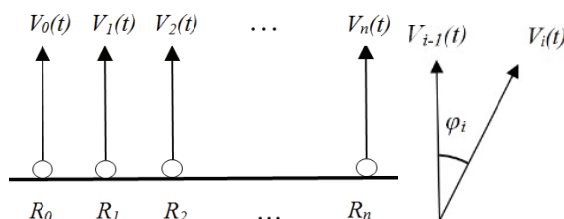


Fig. 4. Movement diagram of a mobile object deployed in a line

3. $x_{i-1}(t) - x_i(t) = D$;
4. $y_i(t) = y_{i-1}(t)$;
5. $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}(t) = \alpha_0$;
6. $\varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ – the angle between the velocity vectors;
 $V_{i-1}(t)$ и $V_i(t)$.

The control method consists in replanning motion parameters of the mobile object at each time instant t . The object moves along the reference trajectory. The control error is represented by the value δ . The integral motion error is defined as the sum of δ over the time interval. Motion control is performed by an adaptation algorithm. The principle is based on adaptive system behavior [15].

Control requires maneuver coordination meanwhile operation safety is ensured. This brings synchronization subsystem motion via distributed control development task. Functioning as an autonomous node. GPS and IMU ensure position determination. Machine learning algorithms predict collisions. Real-time trajectory optimization. Speed, orientation, and position correction. Maintaining specified intervals and safe distances. The object is controlled via an adaptive state vector. Components determine position, orientation in the absolute coordinate system, and linear velocity. The desired trajectory is specified. Distance to the reference point and turn angle are specified a priori. Information is received from internal sensors, while adherence to decentralized control principles reduces communication channel requirements.

Adaptation implementation uses a model based on adaptive automata [16]. The state vector parameter is linked to an "adaptation machine". Two state groups: "adjust parameter" and "retain parameter". Memory depth determines the number of states. The input signal is the environment response: "reward" or "punishment". The control process includes four cycles: value fixation, deviation estimation, automaton transition, and action execution [17]. The approach ensures minimization of discrepancy between actual and target parameter values. The control architecture relies on the concept of virtual structures. The object occupies a position relative to a generalized point in space. Artificial intelligence methods are applied [18]. Neural networks and evolutionary algorithms respond to environment changes. Obstacles, failures, noise. Transmitted information volume is minimized. The system is designed to function under low communication conditions.

Results

The experimental study was conducted in the 3D simulator Gazebo. A multi-rotor mobile object based on the ArduPilot autopilot was employed. Characteristics: quadcopter configuration, mass up to 2.5 kg, dimensions up to 0.5 m. The flight task included automatic horizontal flight at constant altitude. Range up to 1 km. Obstacle avoidance and return. Distance to obstacles varied from 1 to 50 m. Motion speed reached $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Obstacles were modeled as rectangular or rounded objects (Fig. 7). Trajectories included rectilinear and curvilinear sections (Fig. 8).

The efficiency assessment of the proposed decentralized control algorithm was conducted using a comprehensive set of quantitative metrics designed to evaluate both operational performance and safety characteristics.

Primary evaluation criteria included: trajectory length, measured as the cumulative path distance traveled by the mobile object relative to the optimal geometric path; task completion time, defined as the temporal interval from mission initiation to successful target acquisition; safety metric, quantified through a probabilistic collision risk model incorporating obstacle density, relative velocity, and minimum separation distance; and mission success rate, calculated as the proportion of trials completed without critical failures or constraint violations.

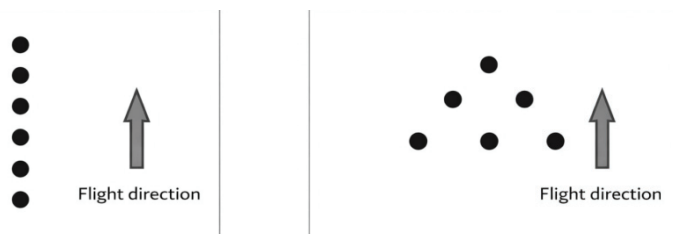


Fig. 7. Building a mobile object into a column and a triangle



Fig. 8. Rectangular obstacle and a group of circular obstacles

Experimental validation was performed in a high-fidelity 3D simulation environment (Gazebo/ROS) featuring multi-rotor aerial platforms operating in cluttered dynamic scenarios. Baseline comparisons included classical artificial potential fields (APF), wavefront global planning, and a centralized model predictive control (MPC) implementation. Each configuration was evaluated across 100 independent Monte Carlo trials with randomized initial conditions, obstacle distributions, and environmental disturbances (wind gusts, sensor noise). Statistical significance was assessed using paired t-tests with Bonferroni correction ($\alpha = 0.05$).

Results demonstrated a consistent improvement in task execution efficiency, with the proposed algorithm achieving a 20–24 % reduction in composite cost function values compared to baseline methods ($p < 0.01$). Specifically, trajectory length decreased by 18.3 % on average, while task completion time improved by 22.1 %. The safety metric showed a 31 % reduction in predicted collision probability, attributable to the adaptive repulsive field modulation and local consensus mechanisms. Mission success rates increased from 76.4 % (APF baseline) to 94.2 % under identical challenging conditions [19].

Computational complexity analysis reveals that the algorithm scales between $O(n^2)$ and $O(n^3)$, where n denotes the number of state variables (position, velocity, orientation) and interacting neighbors. The quadratic component arises from pair wise interaction calculations in the potential field evaluation, while the cubic term corresponds to the adaptive automata state-transition matrix updates during high-density coordination phases. For typical deployments involving 5–20 agents with 6–12 state variables each, average per-step computation time remained below 15 ms on embedded hardware (NVIDIA Jetson AGX), satisfying real-time control requirements at 50 Hz update rates.

Memory footprint was optimized through sparse representation of interaction graphs and incremental map updates, maintaining peak RAM usage under 256 MB. Communication overhead was reduced by 67 % compared to centralized approaches through event-triggered data exchange protocols, transmitting updates only when state deviations exceeded adaptive thresholds [20].

Limitations include increased computational demand during sudden environmental reconfiguration events and sensitivity to extreme communication delays (>200 ms). Future work will explore hierarchical decomposition strategies and learned communication pruning to further enhance scalability for large-scale swarms (>50 agents).

Conclusion

The practical implementation of the developed methods focuses primarily on high-stakes applications such as search-and-rescue (SAR) operations and disaster response tasks. In these scenarios, environments are typically unstructured, hazardous, and characterized by degraded communication infrastructure, necessitating a high degree of system independence. The proposed control rules are specifically engineered to ensure full autonomy, enabling agents to operate without continuous human supervision or reliance on centralized command nodes. This capability is critical for accessing confined spaces, disaster zones with unstable structures, or areas contaminated by hazardous materials where human entry is prohibited.

The control architecture facilitates dynamic parameter correction through continuous real-time monitoring of system states. The mobile object autonomously adjusts its position, orientation, and velocity vectors based exclusively on local information gathered from onboard sensors (e.g., LiDAR, IMU, optical flow). This local perception loop allows the system to navigate effectively in GPS-denied environments and react to sudden environmental changes, such as shifting debris or emerging obstacles, without waiting for external updates.

A key feature of the system is its inherent fault tolerance designed to maintain mission continuity under degraded conditions. Trajectory maintenance is guaranteed even during individual subsystem failures, such as actuator degradation or sensor drift. The algorithm employs redundancy management and control allocation strategies to redistribute control effort among remaining functional components. Furthermore, a specialized maneuvering structure is introduced to actively eliminate deviations from the specified trajectory. This structure utilizes predictive error correction to anticipate drift caused by external disturbances (e.g., wind gusts, turbulence) and applies compensatory maneuvers before deviations exceed safety thresholds.

The developed algorithm, grounded in adaptation principles and inspired by biological system behavior (specifically swarm intelligence and homeostatic regulation), demonstrates exceptional reliability, scalability, and robustness to external disturbances. By mimicking the self-organizing properties of social organisms, the system achieves emergent stability without complex global modeling. This bio-inspired approach ensures that performance degrades gracefully rather than catastrophically under stress. Scalability is maintained as the number of agents increases, making the solution suitable for both single-unit deployments and coordinated multi-agent swarm operations. Consequently, the system provides a resilient framework for autonomous operations in the most demanding and unpredictable operational theaters.

References

1. GOST R 59517-2021. *Bespilotnyye aviatsionnyye sistemy. Klassifikatsiya i kategorizatsiya* [Unmanned aerial systems. Classification and categorization:], Moscow: Standartinform, 2021, 14 p. (In Russ.)
2. Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Bioinspired Method for Solving Invariant Combinatorial–Logic Problems on Graphs, *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*, 2025, vol. 35, no. 4, pp. 1145-1150. doi: 10.1134/S1054661825701044
3. Sergeyev D.A., Rodionov D.G., Polyakov P.A. [et al.] [Intelligent system for monitoring and adapting the route of unmanned aerial vehicles based on neural network analysis of risk objects], *Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody* [Software systems and computational methods], 2025, no. 1, pp. 55-70. doi: 10.7256/2454-0714.2025.1.73255 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Mityakov Ye.S., Shmeleva A.G., Ladynin A.I. *Iskusstvennyy intellekt i mashinnoye obucheniye: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Artificial intelligence and machine learning: a textbook for universities], St.-Petersburg: Lan', 2026, 252 p. (In Russ.)
5. Sitnikov A.V., Kharisov A.R. [Analysis of existing swarm intelligence systems for coordinated flight of aircraft-type drones], *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], 2025, no. 12(93), pp. 145-159. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Telegin V.A. [Ant algorithms for solving the traveling salesman problem], *MNIZH* [MNIZH], 2024, no. 7(145), pp. 78-91. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Yushchenko A.S. [Fuzzy logic methods in the control of mobile manipulation robots], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2012, no. 6(6), pp. 45-58. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Israfilov A. [Modern Challenges in the Field of Cybersecurity of Unmanned Aircraft Systems], *Universum: tekhnicheskiye nauki* [Universum: Technical Sciences], 2024, no. 2(119), pp. 34-47. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Chzhu Yu. [Model of the Unmanned Aerial Vehicle (Quadcopter) Control System], *Informatika, telekommunikatsii i upravleniye* [Computer Science, Telecommunications and Control], 2022, no. 3, pp. 67-82. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Yermilov A.S., Saltykova O.A. [Multi-agent Control Systems for a Group of Unmanned Aerial Vehicles], *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [Science-Intensive Technologies in Space Research of the Earth], 2025, no. 1, pp. 34-47. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Ali B., Sadekov R.N., Tsodokova V.V. [Algorithms for navigation of unmanned aerial vehicles using machine vision systems], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2022, no. 4(119), pp. 89-105. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Kim S.A., Pyrkin A.A., Borisov O.I. [Algorithm for coordinated trajectory control of quadcopter motion], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [News of higher educational institutions. Instrument engineering], 2024, vol. 67, no. 5, pp. 385-394. doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-385-394 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Bryukhovetskiy A.A., Moiseyev D.V. [Software Model for Forming Virtual Clusters of Network Nodes in Mobile Transport Networks], *Tavricheskiy vestnik informatiki i matematiki* [Tavrishesky Bulletin of Informatics and Mathematics], 2023, no. 2(59), pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Kapral'nyy Yu.V., Ivanova A.M., Vorotnikov A.M. [Application of Artificial Intelligence in Controlling a Group of Unmanned Aerial Vehicles in the Elimination of Interregional Emergencies in the Northern Territories of Russia], *Arktika 2035* [Arctic 2035], 2025, no. 22, pp. 112-125. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Senchuk D.V. [Study of the Features of the Functioning of a Scenario Algorithm in the Control System of an Unmanned Aerial System], *Izvestiya AltGU* [Bulletin of Altai State University], 2023, no. 4(132), pp. 89-102. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Prokop'yev A.P. [On the Issue of Building an Intelligent Density Control System for Asphalt Pavers Based on Software and Hardware Using a Data Pipeline], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 2, pp. 103-119. doi: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.103-119 (In Russ., abstract in Eng.)
17. Balabanov P.V., Yegorov A.S., Senkevich S.A. [et al.], [Modeling of a Control System for a Ground-Based Robotic Platform for Agriculture], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 4, pp. 58-73. doi: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.058-073 (In Russ., abstract in Eng.)
18. Obukhov A.D., Patutin K.I., Surkova Ye.O., Arkhipov A.Ye. [Control system for an adaptive running platform based on computer vision technologies], *Transactions*

of the Tambov State Technical University, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 45-61. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.045-061 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Shmeleva A.G., Beskhmel'nov M.I. [Generalized set covering problem by the adaptive chromosome swarm method in affine solution space], *Informatsionnyye tekhnologii* [Information Technologies], 2025, vol. 31, no. 12, pp. 619-629. doi: 10.17587/it.31.619-629 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Zuo H., Shen Q., Ouyang Sh. [et al.], Adaptive fault-tolerant attitude control on SO(3) under multiple attitude constraints and finite sequential actuator faults, *Acta Astronautica*, 2025, vol. 228, pp. 370-383. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.11.062

Методология управления движением групп беспилотных аппаратов

© М. И. Бесхмельнов¹✉

¹ Кафедра информатики, *m_beskhmelnov@mail.ru*;
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
Москва, Российская Федерация

Ключевые слова: адаптивное управление; искусственный интеллект; автономная навигация; предотвращение столкновений; децентрализованная архитектура; управление мобильными объектами; планирование траектории.

Аннотация: Рассмотрена комплексная задача управления автономными мобильными объектами в условиях динамически изменяющейся среды. Для повышения автономности системы и согласованности функционирования разработан децентрализованный алгоритм управления. Методология интегрирует метод искусственных потенциальных полей, адаптивные автоматы и принципы роевого интеллекта, вдохновленные поведением социальных организмов, таких как муравьи и пчелы. Система обеспечивает точное отслеживание траектории и эффективное избегание столкновений в процессе функционирования, опираясь преимущественно на локальный обмен информацией. В целях обеспечения стабильности и устойчивости управления значительно снижена нагрузка на каналы связи, минимизирована зависимость от централизованных узлов. Процесс управления включает сбор данных, диагностику среды, формирование модели и выбор стратегии с использованием волновых алгоритмов и алгоритмов оптимизации муравьиной колонии. Экспериментальная проверка проведена в комплексном 3D-симуляторе с использованием мультироторных аппаратов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 59517–2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация. – Введ. : 2021-07-01. – Москва :Стандартинформ, 2021. – 14 с.
2. Lebedev, O. B. Bioinspired Method for Solving Invariant Combinatorial–Logic Problems on Graphs / O. B. Lebedev, M. I. Beskhmel'nov // *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*. – 2025. – Vol. 35, No. 4. – P. 1145–1150. doi: 10.1134/S1054661825701044
3. Сергеев, Д. А. Интеллектуальная система мониторинга и адаптации маршрута беспилотных летательных аппаратов на основе нейросетевого анализа объектов риска / Д. А. Сергеев, Д. Г. Родионов, П. А. Поляков [и др.] // *Программные системы и вычислительные методы*. – 2025. – № 1. – С. 55–70. doi: 10.7256/2454-0714.2025.1.73255

4. Митяков, Е. С. Искусственный интеллект и машинное обучение : учебное пособие для вузов / Е. С. Митяков, А. Г. Шмелева, А. И. Ладынин. – 2-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2026. – 252 с.
5. Ситников, А. В. Анализ существующих систем роевого интеллекта для координированного полета дронов самолетного типа / А. В. Ситников, А. Р. Харисов // Вестник науки. – 2025. – № 12 (93). – С. 145–159.
6. Телегин, В. А. Муравьиные алгоритмы для решения задачи коммивояжера // МНИЖ. – 2024. – № 7 (145). – С. 78–91.
7. Ющенко, А. С. Методы нечеткой логики в управлении мобильными манипуляционными роботами / А. С. Ющенко // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 6 (6). – С. 45–58.
8. Ибрафиллов, А. Современные вызовы в области кибербезопасности беспилотных авиационных систем / А. Ибрафиллов // Universum: технические науки. – 2024. – № 2(119). – С. 34–47.
9. Чжу, Ю. Модель системы управления беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) / Ю. Чжу // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2022. – № 3. – С. 67–82.
10. Ермилов, А. С. Мультиагентные системы управления группой беспилотных летательных аппаратов / А. С. Ермилов, О. А. Салтыкова // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2025. – № 1. – С. 34–47.
11. Али, Б. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения / Б. Али, Р. Н. Садеков, В. В. Цодокова // Гирокоспия и навигация. – 2022. – № 4 (119). – С. 89–105.
12. Ким, С. А. Алгоритм согласованного траекторного управления движением квадрокоптера / С. А. Ким, А. А. Пыркин, О. И. Борисов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 5. – С. 385–394. doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-385-394
13. Брюховецкий, А. А. Программная модель формирования виртуальных кластеров сетевых узлов в мобильных транспортных сетях / А. А. Брюховецкий, Д. В. Моисеев // Таврический вестник информатики и математики. – 2023. – № 2(59). – С. 50–59.
14. Капральный, Ю. В. Применение искусственного интеллекта в управлении группой беспилотных летательных аппаратов в ликвидации межрегиональных чрезвычайных ситуаций на северных территориях России / Ю. В. Капральный, А. М. Иванова, А. М. Воронников // Арктика 2035. – 2025. – № 22. – С. 112–125.
15. Сенчук, Д. В. Исследование особенностей функционирования сценарного алгоритма в системе управления беспилотной авиационной системы / Д. В. Сенчук // Известия АлтГУ. – 2023. – № 4 (132). – С. 89–102.
16. Прокопьев, А. П. К вопросу построения интеллектуальной системы контроля плотности для асфальтоукладчиков на основе программно-аппаратных средств с применением конвейера данных / А. П. Прокопьев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 2. – С. 103–119. doi: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.103-119
17. Моделирование системы управления наземной робототехнической платформой для сельского хозяйства / П. В. Балабанов, А. С. Егоров, С. А. Сенкевич [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 4. – С. 58–73. doi: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.058-073
18. Обухов, А. Д. 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. 45–61. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.045-061

19. Лебедев, Б. К. Обобщенная задача покрытия множества методом роя адаптивных хромосом в аффинном пространстве решений / Б. К. Лебедев, О. Б. Лебедев, А. Г. Шмелева, М. И. Бесхмельнов // Информационные технологии. – 2025. – Т. 31, № 12. – С. 619–629. doi: 10.17587/it.31.619-629

20. Zuo, H. Adaptive fault-tolerant attitude control on SO(3) under multiple attitude constraints and finite sequential actuator faults / H. Zuo, Q. Shen, Sh. Ouyang [et al.] // Acta Astronautica. – 2025. – Vol. 228. – P. 370–383. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.11.062

Methodologie zur Steuerung der Bewegung von Gruppen unbemannter Luftfahrzeuge

Zusammenfassung: Es ist eine komplexe Aufgabe der Steuerung autonomer mobiler Objekte in dynamisch veränderlichen Umgebungen betrachtet. Zur Verbesserung der Systemautonomie und der Betriebskonsistenz ist ein dezentraler Steuerungsalgorithmus entwickelt. Die Methodologie integriert Methoden künstlicher Potenzialfelder, adaptive Automaten und Prinzipien der Schwarmintelligenz, inspiriert vom Verhalten sozialer Organismen wie Ameisen und Bienen. Das System gewährleistet präzise Verfolgung der Trajektorie und effektive Kollisionsvermeidung während des Betriebs, vor allem auf den lokalen Austausch von Informationen basierend. Um Stabilität und Robustheit der Steuerung zu gewährleisten, ist die Last auf die Kommunikationskanäle deutlich reduziert und die Abhängigkeit von zentralen Knoten minimiert. Der Steuerungsprozess umfasst Datenerfassung, Umgebungsdiagnostik, Modellgenerierung und Strategiewahl mittels Wellenalgorithmien und Ameisenkolonieoptimierungsalgorithmen. Die experimentelle Verifizierung erfolgte in einem komplexen 3D-Simulator mit Multikoptern.

Méthodologie de la gestion des mouvements des groupes de drones

Résumé: Est examinée la tâche complexe de la gestion des objets mobiles autonomes dans un environnement en évolution dynamique. Est mis au point un algorithme décentralisé de la gestion pour améliorer l'autonomie du système et la cohérence du fonctionnement. La méthodologie intègre la méthode des champs potentiels artificiels, les automates adaptatifs et les principes de l'intelligence des essaims inspirés par le comportement des organismes sociaux tels que les fourmis et les abeilles. Le système assure un suivi précis de la trajectoire et une évitement efficace des collisions en cours du fonctionnement, en s'appuyant principalement sur l'échange local des informations. Afin d'assurer la stabilité de la gestion, est considérablement réduite la charge sur les canaux de communication; est minimisée la dépendance à l'égard des nœuds centralisés. Le processus de gestion comprend la collecte de données, le diagnostic de l'environnement, la formation du modèle et le choix de la stratégie à l'aide d'algorithmes d'onde et d'algorithmes d'optimisation des colonies de fourmis. La vérification pilote a été réalisée dans un simulateur 3D utilisant des appareils multiréacteur.

Автор: *Бесхмельнов Максим Игоревич* – преподаватель кафедры информатика, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТИВОМ РОБОТОВ НА ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© В. Ф. Калинин¹✉, В. А. Погонин²

¹ Кафедра «Электроэнергетика», kalinin@tstu.ru;

² кафедра «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: вероятность; классификация задач; мультиагентное управление роботами.

Аннотация: Проведена систематизация задач управления коллективом роботов-лаборантов. Задачи определения траекторий перемещения захватного устройства робота систематизированы на основе различных критериев: необходимости следования захватного устройства по заранее определенной траектории или же указания не всего маршрута, а лишь конечной точки его перемещения; определения траектории во времени, предполагающей нахождение в фиксированной точке в определенный момент, или параметрического задания, предполагающего последовательное прохождение захватным устройством определенной совокупности точек, но без фиксации момента времени этого прохождения; определения траектории, когда требуется не только нахождение захватного устройства в заданной точке пространства, но и его ориентация в пространстве; задач нахождения траектории в предопределенном виде или с учетом вероятности случайных флуктуаций в движении захватного устройства, обусловленных воздействием случайных помех. Рассмотрен ряд модификаций известных методов оптимального управления, позволяющих в некоторых случаях находить оптимальные траектории более эффективно (с меньшими временными потерями, более точно с использованием «технологичного» класса возможных траекторий).

Введение

Задачи управления роботами на химических предприятиях представляют собой сложную и специфическую область, требующую тщательного анализа и подхода [1 – 3]. Разнообразие работ, выполняемых роботами, таких как химический анализ веществ и производственной среды, очистка поверхностей оборудования и другие, а также опасные условия, в которых эти работы выполняются, делают эти задачи уникальными и сложными [4, 5].

Классификация задач оптимального управления

Математическое моделирование разнообразных задач оптимального управления позволяет в данной работе классифицировать их по нескольким основным видам.

Для удобства рассмотрения определим следующие обозначения. Программа управления (**П**) роботом представляет собой последовательность команд, которые подаются на приводы робота и гарантируют требуемое движение захватного уст-

ройства. Положение захватного устройства в трехмерном пространстве R^3 обозначим вектором $Y = (y_1, y_2, y_3)$. В случае, если положение захватного устройства характеризуется еще и ориентацией в пространстве, обозначим его несимметричным вектором $Y = (y_1, y_2, \dots, y_6)$ в шестимерном евклидовом пространстве R^6 .

Рассмотрим $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ как набор обобщенных координат, представляющих собой угловые и линейные перемещения захватного устройства. Примем, что кинематическое уравнение известно

$$Y = f(Q) \quad (1)$$

или

$$\hat{Y} = f(Q). \quad (2)$$

Также предположим, что известен вектор дифференциальных уравнений, который описывает динамическое поведение манипулятора [6, 7]. Этот вектор показывает, как изменяются обобщенные координаты манипулятора во времени под действием приложенных сил или моментов $U(t) = (u_1, \dots, u_n)$

$$M(Q(t), Q'(t)) + G(Q(t), Q'(t)) = U(t), \quad (3)$$

где $M(Q)$ – обобщенная матрица инерции; $G(Q(t), Q'(t))$ – вектор эквивалентных сил.

В рабочей зоне манипулятора $Y \in R^k$ ($k = 3$ или 6) есть точки, которые он занимает в определенные моменты времени $t \in [t_0, t_k]$. Их можно обозначить как L . В эти моменты манипулятор находится в начале или конце своего движения. Положение точек можно точно определить с помощью обобщенных координат Q

$$L = f(Q). \quad (4)$$

Определим множество точек $\hat{L}_n(t)$, которые в момент времени t выделяют в рабочей зоне область Y , исключающую попадание в нее точек тела манипулятора. Данное множество $\hat{L}_n(t)$ служит своего рода препятствием (в том числе движущимся) для манипулятора.

Отметим, что препятствием могут быть манипулятор другого робота, технологическое оборудование, трубопроводная система и др.

Отсутствие коллизий манипулятора с препятствиями отвечает условию непересечения множеств

$$L(Q(t)) \cap \hat{L}_n(t) = \emptyset, \text{ для } t \in [t_0, t_k]. \quad (5)$$

Выполнения условия (5) не хватает. Требуется, чтобы манипулятор имел достаточный запас надежности, обеспечивающий безопасное прохождение вблизи препятствий. Это требование можно представить, приведя определение расстояния $\rho = (x, \hat{L}_n)$ между точкой $x \in R^k$ и множеством $\hat{L}_n(t)$

$$\rho = (x, \hat{L}_n) = \min \rho(x, z), \quad (6)$$

где $x, z \in R^k$, $\rho(x, z)$ – расстояние между двумя точками в R^k .

В момент времени t манипулятор должен находиться на расстоянии от препятствия не менее чем на $r_{кр}$, запишем

$$\forall x \in \hat{L}_n(Q(t)): \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{кр}) \geq P_k, \quad (7)$$

где Вер – вероятность события; P_k – предельное значение вероятности.

В реальных задачах существует возможность уменьшить мощность множеств $\hat{L}_n(Q(t))$.

Действительно, нет необходимости проверять выполнение (7) для всех точек $x \in \hat{L}_n(Q(t))$. Всегда можно найти некоторое множество критических точек $\hat{L}_{кр} \subset \hat{L}_n(Q(t))$ – таких, что если точки $x \in \hat{L}_{кр}$ не проходят близко от препятствия, то остальные точки тем более удовлетворяют условиям зоны надежности от столкновения. При этом (7) заменяется условием

$$\forall x \in \hat{L}_{кр}(Q(t)) : \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{кр}) \geq P_k. \quad (8)$$

Следующим основополагающим условием является недопущения коллизии между звеньями манипулятора. Определим на звеньях манипулятора ключевые контрольные точки, несущие наибольший риск столкновений. Их расположение подбирается таким образом, чтобы исключение вероятности столкновения в этих точках гарантировало полную безопасность для всех остальных участков звеньев. Определение множества J таких точек не представляет значительной сложности, поскольку области повышенной опасности столкновений в промышленных роботах-манипуляторах, как правило, очевидны и легко выявляются.

Положение $J(Q)$ области R^k устанавливается заданием обобщенных координат Q . Поскольку траектория $Q(t)$ случайна, согласно (3), условие столкновения звеньев манипулятора может быть записано в виде

$$\forall (x, z) \in J(Q(t)) : \text{Вер}\{\rho_T(x, z)\} \geq r_{\min}, \quad (9)$$

где $r_{\min}$ – минимальная допустимая близость контрольных точек звеньев манипулятора.

Задачи определения траекторий перемещения захватного устройства могут быть систематизированы на основе различных критериев:

- необходимости следования захватного устройства по заранее определенной траектории или же указание не всего маршрута, а лишь конечной точки его перемещения;

- определения траектории во времени, предполагающей нахождение в фиксированной точке в определенный момент, или параметрического задания, предполагающего последовательное прохождение захватным устройством определенной совокупности точек, но без фиксации момента времени этого прохождения;

- определения траектории в R^3 или даже в R^6 , когда требуется не только нахождение захватного устройства в заданной точке пространства, но и его ориентация в пространстве;

- задач нахождения траектории, которые могут быть сформулированы в предопределенном виде или с учетом вероятности случайных флуктуаций в движении захватного устройства, обусловленных воздействием случайных помех.

Представим данные задачи более подробно.

Материалы и методы исследования

Задача $\tilde{A}$.

В данной задаче предполагается, что на временном интервале $[t_0, t_k]$ в пространстве R^3 задана траектория $Y(t)$, которая записывается следующим образом.

Для заданной функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$, определенной на некотором интервале времени $[t_0, t_k]$, требуется найти вектор-функцию U^* , которая будет удовлетворять в каждый момент времени этого интервала определенным условиям

$$\text{Вер}\{|Y(t) - F(Q(t))| \leq \sigma\} \geq P_y, \quad (10)$$

где P_y – предельное значение вероятности;

$$M(Q(t), Q''(t)) + G(Q(t), Q'(t)) = U(t), \quad (11)$$

удовлетворяются условия отсутствия столкновений:

$$\begin{aligned} \forall x \in \hat{L}_n(Q(t)) : \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{\text{кр}}) &\geq P_K; \\ \forall x \in \hat{L}_{\text{кр}}(Q(t)) : \text{Вер}(\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{\text{кр}}) &\geq P_n, \end{aligned} \quad (12)$$

конструктивные ограничения на обобщенные координаты и управляющие воздействия:

$$\begin{aligned} Q_{\min} &\geq Q(t) \geq Q_{\max}; \\ Q'_{\min} &\geq Q'(t) \geq Q'_{\max}; \\ U_{\min} &\geq U(t) \geq U_{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

и условия начального положения манипулятора:

$$Q(t_0) = Q_0; \quad Q'(t_0) = Q'_0, \quad (14)$$

где Q_0, Q'_0 – заданные величины.

Иначе говоря, в задаче $\tilde{A}$ необходимо отыскать программу изменения управляющих воздействий U^* манипулятора, находящегося в момент времени t_0 в состоянии (Q_0, Q'_0) , при котором захватное устройство с вероятностью не меньше заданной опишет траекторию, отличающуюся от заданной $Y(t)$ не больше чем на σ , и при этом звенья робота с гарантированной вероятностью не сталкиваются между собой и внешним препятствиями.

Задача $\tilde{A}_{\text{опт}}$.

В ряде случаев возможно существование не одной, а целого множества программ U^* , которые удовлетворяют условиям (10) – (14) и являются решением рассматриваемой задачи. В такой ситуации возникает необходимость постановки задачи поиска оптимальной программы управления, которая бы соответствовала условиям (10) – (14) и при этом минимизировала функционал вида

$$J = M \left[\int_{t_0}^{t_k} Q(Q, Q', U) dt \right], \quad (15)$$

где M – математическое ожидание.

В качестве критерия J в большинстве случаев отдают предпочтение энергетическим затратам, однако существует и альтернативный критерий – минимальное количество движений захватного устройства.

Задача $\tilde{B}$.

Цели и задачи $\tilde{B}$, $\tilde{B}_{\text{опт}}$ и $\tilde{A}$, $\tilde{A}_{\text{опт}}$, несмотря на то что подобны, имеют одно существенное различие: в задачах $\tilde{B}$ и $\tilde{B}_{\text{опт}}$ на временном отрезке $[t_0, t_k]$ фиксируются не только позиции захватного устройства в каждый момент времени, а также ориентация, то есть $Y_3(t) \in R^6$.

Итак, в задаче $\tilde{B}_{\text{opt}}$ необходимо определить программу изменения управляющих воздействий и найти закон изменения обобщенных координат $Q(t)$ на интервале $[t_0, t_k]$, который позволит осуществить заданное перемещение $Y_3(t)$. При этом следует учесть условия (10) – (14), а целевая функция (15) должна принимать минимальное значение.

Задача $\tilde{C}$.

Альтернативный тип задач $\tilde{A}$ и $\tilde{A}_{\text{opt}}$ – это задачи $\tilde{C}$ и $\tilde{C}_{\text{opt}}$, которые отличаются от предыдущих тем, что помимо указания траектории на отрезке $[t_0, t_k]$, необходимо также определить ориентацию захвата в конечный момент времени t_k , то есть $Y_3(t) \in Y \subset R^6$.

Задача $\tilde{D}$.

В условии задачи указываются координаты точки $Y_3(t) \in Y \subset R^3$, в которую перемещается захватное устройство в момент времени t_k .

Следовательно, задача $\tilde{D}$ состоит в том, чтобы найти вектор-функцию $U^*(t)$, определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в заданный конечный момент времени t_k удовлетворяется следующее требование

$$\text{Вер}\{|F(Q(t_k)) - Y_3| \leq \sigma\} \geq P_y, \quad (16)$$

и функции U^* и Q^* удовлетворяют (11) – (14).

Другими словами, требуется определить алгоритм изменения управляющих сигналов для манипулятора, который в момент времени t_0 находится в определенном положении $(Q_0, \dot{Q}_0)$. При этом необходимо обеспечить попадание захватного устройства в заданную точку Y_3 в момент времени t_k с заданной вероятностью. Важно также, чтобы звенья робота не сталкивались друг с другом и с внешними препятствиями с заданной вероятностью.

В ситуации, когда существует несколько альтернативных программ управления, может быть поставлена задача $\tilde{D}_{\text{opt}}$, в которой дополнительным условием является минимизация целевой функции вида (15).

В задачах $\tilde{D}$, $\tilde{D}_{\text{opt}}$ в качестве целевой функции часто используют время перелоа захватного устройства в положение Y_3 . Формально эту целевую функцию получают из (15) при $Q(Q, \dot{Q}, U) \equiv 1$. Такая целевая функция может быть использована, например, при управлении роботом-сборщиком химической аппаратуры, когда максимальная производительность робота во многом определяется минимизацией времени перемещения в позицию, в которой располагается комплектующее изделие, а также временем захвата этого изделия и перемещения его на место установки.

Параметрические задачи.

Задачи $\tilde{A}^\lambda, \tilde{B}^\lambda, \tilde{C}^\lambda$, подобные рассматриваемым $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$, характеризуются тем, что пространственное положение захватного устройства не коррелирует с определенным временным моментом. Траектория движения захватного устройства определяется как функция параметра λ , где $\lambda \in [0, \lambda_{\text{max}}]$.

Очевидно, в этом случае должна существовать некоторая монотонно возрастающая функция ψ , связывающая параметр λ и временной параметр t таким образом, что

$$\lambda = v(t); \quad 0 = v(t_0), \lambda_{\max} = v(t_k), \quad (17)$$

при которой выполняется требование

$$\text{Вер}\{|Y_3(v(t)) - F(Q(t))| \leq \sigma\} \geq P_y. \quad (18)$$

Задача $\tilde{A}_{\text{опт}}^\lambda$.

Необходимо для заданной на $\lambda \in [0, \lambda_{\max}]$ функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$ найти функцию $v(t)$, удовлетворяющую (17) и вектор-функцию U^* , определенную на $[t_0, t_k]$, при которых в каждый момент времени выполняются условия (18), (11) – (14) и минимизируется целевая функция (15).

Задача $\tilde{B}_{\text{опт}}^\lambda$.

Эта задача является вариантом задачи $\tilde{A}_{\text{опт}}^\lambda$, когда параметрически заданы не только положение, но и ориентация захватного устройства $Y_3(t) \in Y \subset R^6$, где $\lambda \in [t_0, t_k]$.

Таким образом, в задаче $\tilde{B}_{\text{опт}}^\lambda$ требуется найти такую функцию $v(t)$, удовлетворяющую (16), и такой закон изменения $U^*(t)$ и соответствующий закон изменения обобщенных координат $Q^*(t)$, при которых выполняются условия (18), (11) – (14) и минимизируется целевая функция (15).

Задача $\tilde{C}_{\text{опт}}^\lambda$.

Другим вариантом задач $\tilde{A}^\lambda, \tilde{A}_{\text{опт}}^\lambda$ являются соответственно задачи $\tilde{C}^\lambda, \tilde{C}_{\text{опт}}^\lambda$, отличающиеся тем, что кроме задания $Y(\lambda) \in R^3$ для $\lambda \in [0, \lambda_{\max}]$, дополнительно для $\lambda = \lambda_{\max}$ задается ориентация захватного устройства.

Отметим, что в ряде случаев, когда нет опасности столкновений звеньев манипулятора между собой, нет жестких требований выполнения заданной траектории или попадания в позицию «целевую точку» или в том случае, если могут быть использованы стандартные роботы с «жесткими» звеньями, целесообразно применять детерминированные задачи, как более простые, позволяющие за значительно более короткое время находить решения.

В этом случае целесообразно формулировать задачи «надежного» управления, под которым понимают задачи определения программ управления, гарантирующие выполнение технологических условий ограничений с вероятностью не ниже заданной.

Рассмотрим постановку задачи A^α построения надежных программ управления, соответствующую задаче $\tilde{A}$.

Задача A^α .

Необходимо для заданной на $[t_0, t_k]$ функции $Y(t) \in Y \subset R^3$ найти вектор-функцию $U^*(t)$, определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в каждый момент t выполняются условия:

$$Y_3(t) = F(Q(t)); \quad (19)$$

$$M(Q(t), \dot{Q}(t)) + G(Q(t), \dot{Q}(t)) = U(t) \quad (20)$$

и удовлетворяются условия отсутствия столкновений

$$\forall x \in \hat{L}_{\text{кр}}(Q(t)) : (\rho(x, \hat{L}_n(t)) \geq r_{\text{кр}}, \quad (21)$$

а также конструктивные ограничения на обобщенные координаты и управляющие воздействия (18) и условия начального положения манипулятора (14).

Таким образом, задачи $\tilde{A}$ и A^α отличаются видом уравнения движения обобщенных координат соответственно (11) и (20) и заданием технологических условий соответственно (10), (12) и (21).

В настоящее время не существует методов решения задач типа A^α , в которых требуется гарантия вероятности выполнения технологических условий типа (10), (12). Будем такие задачи называть гарантированными задачами оптимального управления.

В работе предлагается алгоритм решения гарантированной задачи. Идея алгоритма – последовательное решение оптимизационных детерминированных задач, таких, что последовательность найденных оптимальных решений их сходится к оптимальному решению первоначальной детерминированной задачи.

Рассмотрим работу данного алгоритма на примере решения задачи $\tilde{A}$.

Блок 1 формирует детерминированную α -задачу, соответствующую первоначальной задаче гарантируемого управления. Для задачи $\tilde{A}$ соответствующая α -задача имеет следующий вид.

Необходимо для заданной на $[t_0, t_k]$ функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$ найти вектор-функцию U^* , определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в каждый момент времени выполняется следующее условие:

$$\begin{aligned} Y_3(t) &= F(Q(t)) ; \\ M(Q(t)) + G(Q(t), Q'(t)) &= U(t) ; \end{aligned}$$

удовлетворяются условия отсутствия столкновений:

$$\begin{aligned} \forall x \in \hat{L}_{\text{кр}}(Q(t)) : \rho(x, \hat{L}_n(t)) - r_{\text{кр}} &\geq \alpha_1 ; \\ \forall (x, z) \in \hat{K}_{\text{кр}}(Q(t)) : \rho_T(x, z) - r &\geq \alpha_2 , \end{aligned} \quad (22)$$

условия (13), (14) и минимизируется

$$J = M \left[\int_{t_0}^{t_k} Q(Q, Q', U) dt \right] .$$

Очевидно, что α -задача является детерминированной и отличается от задачи A^α условиями (21), (22). В том случае, если $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, α -задача становится тождественной задаче A^α .

Очевидно, что алгоритмы решения α -задач (блок 2) тождественны алгоритмам решения детерминированных задач A^α , B^α , C^α и др.

В блоке 3 проводится многократное решение вероятностного уравнения (11) при заданной функции $U^*(t)$, полученной в блоке 1 при решении α -задачи.

При интегрировании (11) каждый раз используется блок генерации случайных функций $\varepsilon(t)$ и $w(t)$. На основе множества просчетов (11) будет получено

множество реализаций $Q(t)$, и по ним в блоке 3 определены вероятности выполнения (10), (12).

Блоки 4 – 8 – диагностика нарушения ограничений и изменения констант α . Если какие-либо ограничения (10), (12), то есть вероятности нарушения соответствующих технологических условий недопустимо велики, в (22) увеличиваются значения α_1 или α_2 или двух сразу, после чего блок 2 решает новую α -задачу с более жесткими требованиями.

В том случае, если вероятности выполнения всех условий (10), (12) больше заданных, можно либо считать решение найденным, либо попытаться ослабить условия, то есть уменьшить α_1 и/или α_2 , что проводится в блоках 7, 8.

Эксперимент показывает, что последовательное решение α -задач сходится и решение задачи гарантированной оптимизации траекторий движения манипулятора происходит за приемлемое время. Предложенный алгоритм является эвристическим для задачи обеспечения траекторий роботов, хотя для некоторых частных задач подобный алгоритм получил теоретическое обоснование. Это обоснование получено для иных задач, но проведенные экспериментальные проверки показывают эффективность использования алгоритма для нахождения оптимальных гарантированных траекторий движения манипулятора робота.

Заключение

Для углубленного исследования теоретических аспектов управления многообразиями задач, выполняемых робототехническими системами, включая химический анализ веществ и производственной среды, очистку поверхностей оборудования и другие критически важные функции, а также работу в опасных условиях, предложена систематизация задач управления коллективом роботов-лаборантов. В рамках данной классификации особое внимание уделяется требованиям к манипулятору робота, который должен обладать необходимым запасом надежности для безопасного перемещения в пространстве, содержащем потенциальные препятствия, такие как манипуляторы других роботов, технологическое оборудование и трубопроводные системы. Кроме того, необходимо исключить возможность коллизий между звеньями манипулятора, что требует тщательной разработки алгоритмов и методов управления, обеспечивающих высокую степень предсказуемости и контроля в динамически изменяющихся условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Калинин, В. Ф. Управление мультиагентной системой роботов-лаборантов / В. Ф. Калинин, В. А. Погонин // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5-1. – С. 43–49. doi: 10.17513/snt.40003
2. Белоглазов, Д. А. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д. А. Белоглазов, А. Р. Гайдук, Е. Ю. Косенко. – Москва : Физматлит, 2015. – 305 с.
3. Воробьева, Н. С. Методы управления манипуляторами на базе трипода при выполнении технологических операций / Н. С. Воробьева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 3. – С. 3–12. doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-314
4. Калинин, В. Ф. Планирование работы коллектива роботов-лаборантов / В. Ф. Калинин, В. А. Погонин // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 9. – С. 20–24. doi: 10.17513/snt.39758
5. Кафаров, В. В. Проблемы управления детерминированно-стохастическими моделями / В. В. Кафаров, В. И. Бодров, В. Г. Матвейкин // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 3. – С. 663–666.
6. Разработка автоматизированного контроля пересечения траекторий движения роботов-манипуляторов / В. В. Булатов, Н. Г. Джаошвили, О. С. Нуяя,

Р. В. Рудаков, М. В. Сержантова, Н. В. Савельев // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 2. – С. 24–29. doi: 10.17513/snt.40299

7. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / В. А. Глазунов, А. Ш. Колисков, А. Ф. Крайнев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 1. – С. 41–49.

Classification of Robotic Team Control Problems in Chemical Industry

© V. F. Kalinin¹✉, V. A. Pogonin²

¹Department of Electric Power Engineering, kalinin@tstu.ru;

²Department of Information Processes and Management,
TSTU, Tambov, Russian Federation

Keywords: probability; task classification; multi-agent robot control.

Abstract: The paper systematizes the tasks of controlling a team of laboratory robots. The tasks of determining the trajectories of the robot's gripper are systematized based on various criteria: the need for the gripper to follow a predetermined trajectory or to specify only the end point of its movement rather than the entire route; Determining a trajectory over time, assuming a fixed point at a specific moment, or a parametric task, assuming a gripper sequentially passes through a specific set of points, but without fixing the time of this passage; determining a trajectory when not only the gripper's location at a given point in space but also its orientation in space is required; problems of finding a trajectory in a predetermined form or taking into account the probability of random fluctuations in the gripper's motion caused by random interference. A number of modifications to well-known optimal control methods are considered, allowing, in some cases, to find optimal trajectories more efficiently (with less time loss, more accurately using a “technological” class of possible trajectories).

References

1. Kalinin V.F., Pogonin V.A. [Control of a Multi-Agent System of Robotic Laboratory Assistants], *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2024. no. 5-1, pp. 43-49. doi: 10.17513/snt.40003 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Beloglazov D.A., Gayduk A.R., Kosenko Ye.Yu. *Gruppovoye upravleniye podvizhnymi ob'yektami v neopredelennykh sredakh* [Group Control of Moving Objects in Uncertain Environments], Moscow: Fizmatlit, 2015, 305 p. (In Russ.)
3. Vorob'yeva N.S. [Control Methods for Tripod-Based Manipulators During Technological Operations], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2022, no. 3, pp. 3-12. doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-314 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kalinin V.F., Pogonin V.A. [Planning the Work of a Team of Robotic Laboratory Assistants], *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2023, no. 9, pp. 20-24. doi: 10.17513/snt.39758 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kafarov V.V., Bodrov V.I., Matveykin V.G. [Problems of Control of Deterministic-Stochastic Models], *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1989, vol. 308, no. 3, pp. 663-666. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Bulatov V.V., Dzhaoshvili N.G., Nuyya O.S., Rudakov R.V., Serzhantova M.V., Savelyev N.V. [Development of automated control of the intersection of the motion trajectories of robotic manipulators], *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern

Science-Intensive Technologies], 2025, no. 2, pp. 24-29. doi: 10.17513/snt.40299 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. [et al.], [Classification principles and methods of analysis of spatial mechanisms with a parallel structure], *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 1990, no. 1, pp. 41-49. (In Russ., abstract in Eng.)

Klassifizierung der Probleme bei der Steuerung eines Roboterteams in der chemischen Produktion

Zusammenfassung: Es sind die Steuerungsprobleme eines Laborroboter-Teams systematisiert. Die Probleme der Bestimmung der Trajektorien des Robotergreifers sind anhand verschiedener Kriterien systematisiert: die Notwendigkeit, dass der Greifer einer vorgegebenen Trajektorie folgt oder nur den Endpunkt seiner Bewegung anstelle der gesamten Route vorgibt; die zeitliche Bestimmung der Trajektorien unter Annahme eines festen Standorts zu einem bestimmten Zeitpunkt oder eine parametrische Aufgabe, bei der der Greifer nacheinander eine bestimmte Menge von Punkten passiert, ohne den Zeitpunkt dieses Durchgangs festzulegen; die Bestimmung der Trajektorien, wenn neben dem Standort des Greifers an einem gegebenen Punkt im Raum auch seine Orientierung im Raum erforderlich ist; Probleme der Bestimmung der Trajektorien in vorgegebener Form oder unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit zufälliger Schwankungen in der Greiferbewegung aufgrund zufälliger Störungen. Es sind verschiedene Modifikationen bekannter optimaler Steuerungsmethoden betrachtet, die es in einigen Fällen ermöglichen, optimale Trajektorien effizienter zu finden (mit geringerem Zeitverlust, genauer durch Verwendung einer „technologischen“ Klasse möglicher Trajektorien).

Classification des tâches de la gestion de l'équipe de robots dans la production chimique

Résumé: Est réalisée une systématisation des tâches de la gestion d'une équipe de robots de laboratoire. Sont systématisées les tâches de la détermination des trajectoires du déplacement du dispositif de la préhension du robot à la base de différents critères: la nécessité de suivre le dispositif de préhension le long d'une trajectoire prédéterminée ou l'indication de l'itinéraire mais seulement du point final de son déplacement; déterminer la trajectoire dans le temps, en supposant qu'il se trouve à un point fixe à un moment donné, ou une tâche paramétrique, en supposant que le dispositif de capture passe successivement un certain ensemble de points, mais sans fixer le moment de ce passage; déterminer la trajectoire, quand il est nécessaire non seulement de trouver le dispositif de capture à un point donné de l'espace, mais aussi son orientation dans l'espace; les tâches de trouver la trajectoire sous une forme prédéterminée ou en tenant compte de la probabilité de fluctuations aléatoires dans le mouvement du dispositif de capture dues à l'influence d'interférences aléatoires. Sont envisagées nombre de modifications des méthodes connues de contrôle optimal, permettant dans certains cas de trouver des trajectoires optimales plus efficacement (avec des pertes de temps plus faibles, plus précisément en utilisant la classe «technologique» des trajectoires possibles).

Авторы: *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика»; *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

ВЫДЕЛЕНИЕ И ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТРИКСОВ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

© А. П. Пацовский¹✉

¹ АО «ГосНИИХиманалит», *patsovskiy_ap@mail.ru*;
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ключевые слова: белки; молочные продукты; пищевые синтетические красители; фальсификация пищевых продуктов.

Аннотация: Исследовано влияние компонентов молочных продуктов на выделение и последующее определение содержания азокрасителей, триарилметановых и индигокармина, используемых для окраски отдельных видов пищевых продуктов в Российской Федерации. Детально изучены факторы влияния состава молочных продуктов на полноту и селективность выделения красителей. Приняты во внимание основные факторы: состав и морфология белковых матриц, стабильность растворов красителей; способы осаждения. Оценены основные сложности выделения. Полученные результаты предоставляют новые возможности специалистам, занимающимся методами оперативного контроля искусственных красителей в пищевых продуктах.

Введение

Начавшееся с конца девяностых годов повсеместное внедрение неиспользуемых в России ранее ненатуральных красителей в состав различных пищевых продуктов повлияло на скорейшую разработку современных оперативных методов контроля сырья и продовольственных товаров, как поступаемых из-за рубежа, так и производимых на местных предприятиях [1]. Синтетические красители в определенных концентрациях и дозах могут оказывать негативное влияние на здоровье человека, вызывая аллергические реакции и гиперактивность, особенно у детей [2]. Несмотря на регламентацию использования синтетических пищевых красителей в продуктах питания, производители порою превышают нормы их допустимого содержания. Поэтому необходимо оперативно контролировать содержание искусственных пищевых красителей в различных продуктах питания, что в основном связано с трудностью их извлечения из сложных пищевых матриц.

Основанные на современных методах анализа нормативные документы по установлению искусственных пищевых красителей в продуктах питания разрабатываются с 1992 г. в связи с большим наплывом импортных товаров на российский рынок. Очевидно, что настоящим прорывом в данном направлении следует считать период 1999 – 2002 гг., когда были разработаны методы, основанные на адсорбции пищевых красителей окисью алюминия с последующим хроматографическим разделением и денситометрированием многокомпонентных красителей [3 – 6]. Впоследствии появились и альтернативные подходы, в основном с использованием аналитических измерительных приборов [5, 7].

Данная работа посвящена разработанному в 2009 г. нормативному документу [7], который регламентирует метод измерения содержания красителей в молочных продуктах с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Следует привлечь внимание к данной методике, так как она имеет очевидные недостатки:

- неудовлетворительные метрологические характеристики результатов измерений – пределы относительной погрешности 45 – 57 %;
- объект измерения (красители) – это лишь пять веществ из гораздо большей группы синтетических ингредиентов, используемых в настоящее время для окрашивания пищевых продуктов;
- детектирование происходит на разных длинах волн, соответствующих максимуму поглощения каждого красителя, что усложняет и значительно замедляет анализ.

Теоретическая часть

Сейчас многие традиционные натуральные компоненты пищи как источники энергии заменены либо так называемыми «идентичными натуральным», либо синтетическими ингредиентами. Это относится к жирам и углеводам, в отличие от белков, имеющих сложный состав и обладающих свойством незаменимости функций аминокислотных соединений для жизнедеятельности человека.

Использование комплексных синтетических пищевых красителей для придания желаемой окраски некоторым молочным продуктам тесно связано с взаимодействием сульфоновых групп, которые входят в структуру всех синтетических красителей, разрешенных в настоящее время для использования в пищевой промышленности [1], с функциональными группами аминокислот.

Считается, что красители должны быть отделены от белковой матрицы либо в процессе пробоподготовки, либо без выделения, если условия для количественной экстракции не могут быть найдены непосредственно на колонке. Главное преимущество последнего подхода – существенное ускорение всего анализа; основные недостатки – частая замена предколонок и наличие большого количества неинформативных пиков на хроматограммах, что заметно усложняет обработку хроматографических данных. Однако, если установлено, что наличие таких пиков не будет мешать чтению хроматограмм, то, по-видимому, такой подход следует считать приемлемым.

Рассмотрим состав и морфологию белковых матриц, а также факторы, стабилизирующие и осаждающие их в растворе. Основой каждого белка является полипептидная цепь. Она не только вытянута в пространстве, но и организована в трехмерную структуру. Особенное взаимное месторасположение в пространстве складчатых, спиральных и неупорядоченных участков полипептидной цепи образует третичную структуру белка, в которую вовлечены дисульфиды и всевозможные типы слабых связей. Известны два общих типа третичной структуры: фибриллярная (имеет вытянутую форму и образует волокнистую структуру ткани) и сферическая, молекулы которой имеют форму, близкую к форме шара или эллипсоида.

Иррегулярные области присущи строению глобулярных белков, бета-складчатым структурам и альфа-спиралям. Известно также, что в глобулярных белках гидрофобные участки содержатся глубоко внутри молекулы [8]. Эта связь приводит к образованию гидрофобных кластеров (центров). Как правило, имеется несколько гидрофобных кластеров в глобулярной молекуле белка. Наличие гидрофобного кластера принуждает молекулу белка в растворе изгибаться сложным образом в пространстве. Это приводит к проявлению двойственности свойств молекулы белков: на внешней стороне макромолекулы в ее третичной структуре имеются гидрофильные группы и, следовательно, молекула в целом гидрофильна,

а гидрофобные радикалы находятся «в глубине» структуры молекулы. Взаимодействие белка с пищевыми ингредиентами часто приводит к поглощению этих веществ белковыми молекулами. Обратный процесс высвобождения чужеродных молекул из матрицы белка называется десорбцией. В среднем молоко содержит около 3,2 % белков. Основным белком в молоке является казеин, содержание которого варьируется в пределах 2,3 – 2,9 %.

Молочные белки относят к глобулярным белкам вследствие пространственного расположения полипептидных цепей. Детальный анализ его вторичной и третичной структур показал, что казеин практически не имеет альфа-спиралей и занимает промежуточное положение между компактной глобулярной структурой и структурой неупорядоченной сшивки, которая обычно наблюдается при денатурации белков глобулярного типа [9]. Помимо казеина, в молоке содержатся сывороточные белки: бета-лактоглобулин, альфа-лактальбумин, иммуноглобулин, сывороточный альбумин и некоторые другие белки, так называемые минорные белки. Бета-лактоглобулин распадается на мономеры уже при нагревании молока до 30 °С. В небольших количествах присутствует также сывороточный альбумин, но не имеет практического значения. К третьей группе относятся белки липидных глобул, которые составляют всего около одного процента от общего количества белков молока [9].

Белок в растворе стабилизирован рядом эффектов.

1. Наличие гидратной оболочки, представляющей собой слой молекул воды, определенным образом выстраиваемых на поверхности молекулы белка. Поверхность молекул белка отрицательно заряжена, и молекулы воды своими диполями к ней притягиваются атомами водорода, несущими парциальный положительный заряд. Вода в гидросфере не позволяет молекулам белка друг друга окружать, агрегироваться и выпадать в осадок (ζ -потенциал). В данном процессе участвует довольно большое количество воды – порядка 3,7 г на 1 г белка (порядка 200...400 моль на моль).

2. Наличие так называемых «свободных заряженных групп». Изoeлектрическая точка (ИЭТ) – значение pH среды, при котором поверхность не несет электрического заряда, существует для большинства белков в слабокислой среде. Для казеина она равна 4,6, а для бета-лактоглобулина – 5,1; то есть кислотных групп больше, чем основных.

Если стоит задача осадить белки из раствора, необходимо удалить оба стабилизирующих фактора: и заряд, и гидратную оболочку молекулы. Высаливание (осаждение белков нейтральными солями металлов первой и второй групп в высоких концентрациях) часто применяют для избавления от гидратной оболочки. Осаждение происходит в виду того, что такие соли очень гидрофильны и при высоких концентрациях проявляют свои водопоглощающие свойства. При добавлении в раствор с белком они сначала растворяются в осмотически свободной воде, а затем конкурируют с белками за гидратирующую воду оболочки [9]. Однако в средах кислых [pH < ИЭТ – 4] или, наоборот, основных [pH > ИЭТ + 4] белковые молекулы не способны выпасть в осадок, поскольку у них имеется еще один стабилизирующий фактор – заряд, который не позволяет белковым молекулам слишком близко приближаться друг к другу и, соответственно, агрегация полипептидных цепей не может происходить. Заряд на молекуле белка устраняется путем приближения значения pH среды возможно ближе к ИЭТ.

Если красители могут быть количественно переведены в избыточную жидкость, такой подход может быть оправдан. В противном случае коагуляция белковых матриц, содержащих большую долю красителей, является скорее нежелательным процессом, приводящим к неприемлемым потерям в выделении анализируемых компонентов.

Результаты предварительных испытаний

Воспроизведена методика определения содержания красителей, представленная в [7]. Установлено, что существенные потери красящих компонентов происходят на стадии фильтрования молочной пробы через мембранный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. То же самое наблюдалось и при центрифугировании анализируемых проб. Промывка фильтров и осадков после проведения центрифугирования и последующее объединение проб ситуацию не изменили. Использование для денатурации белков воздействия ультразвука с рабочей частотой 40 кГц, и нагрев до 60 °С, также не оказали положительного эффекта.

Применение воздействующих на белки химических реагентов и последующее фильтрование показали следующее: использование нейтральных солей (хлоридов натрия и кальция) и органических растворителей (метанола, ацетона) заметно влияет на степень извлечения красителя только при добавлении 10 % раствора NaOH_{aq} до $\text{pH} \approx (8,5 \dots 9,0)$. Степень извлечения некоторых красителей (E102, E110, E142) достигала приемлемых значений (более 85 %), но для отдельной группы красящих веществ (E122, E131, E132) оказалась менее 40 %. Закисление среды до $\text{pH} \approx 3,0$ приводило только к агломерации белков с явным визуальным обесцвечиванием исследуемого продукта.

На основании этих результатов было решено ограничить пробоподготовку только подщелачиванием анализируемых образцов.

Материалы и методы

Исследуемые образцы – биокефир, пастеризованное молоко и йогурт.

Введенные многокомпонентные композиции красителей: Тартразин E102, Желтый «Солнечный закат» E110, Кармуазин E122, Амарант E123, Понсо 4R E124, Красный очаровательный AC E129, Синий патентованный V E131, Индигокармин E132 и Зеленый S E142 – с содержанием каждого 10 млн^{-1} (ppm).

В работе использовано следующее оборудование:

– жидкостный хроматограф Shimadzu LC-20 состоит из следующих компонентов для высокоэффективных хроматографов: спектрофотометрический детектор SPD-20A, автодозатор SIL-20A, блок подачи растворителя LC-20AD, проточный дегазатор DGU-20A5R, блок управления системой CBM-20A, резервуарная камера LC-20AD, термостат колонки CTO-20AC, реализованный через пакет прикладных программ Shimadzu LC solution chromatographic instrument;

– ультразвуковая ванна Branson;

– виалы вместимостью 1 мл Macherey-Nagel GmbH Co. KG.

Реагенты: ацетонитрил, ос. ч., «Криохром», сорт 0; ацетат натрия, Sigma.

Хроматографические условия:

– колонка (250 · 4,6) см^3 , октадецилсиликагель 5 мкм, Inertsil C18 (2) 150A, Phenomenex с предколонкой KJO-4282;

– подвижная фаза – 0,02 М раствор ацетата натрия : ацетонитрил: от (95 : 5) – первые три мин до (60 : 40) двенадцать мин с градиентом состава подвижной фазы изменяемым программно;

– детектор – 280 нм и 370 нм;

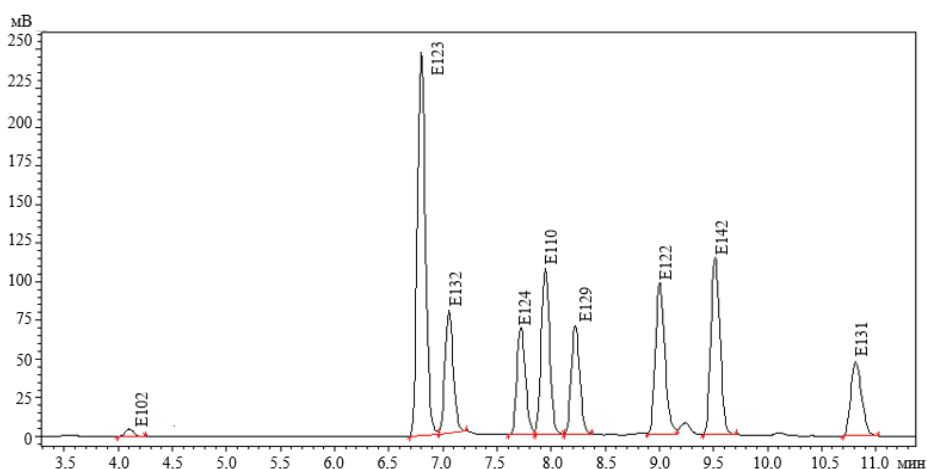
– температура колонки – 25 °С;

– скорость потока – 1,0 $\text{см}^3/\text{мин}$;

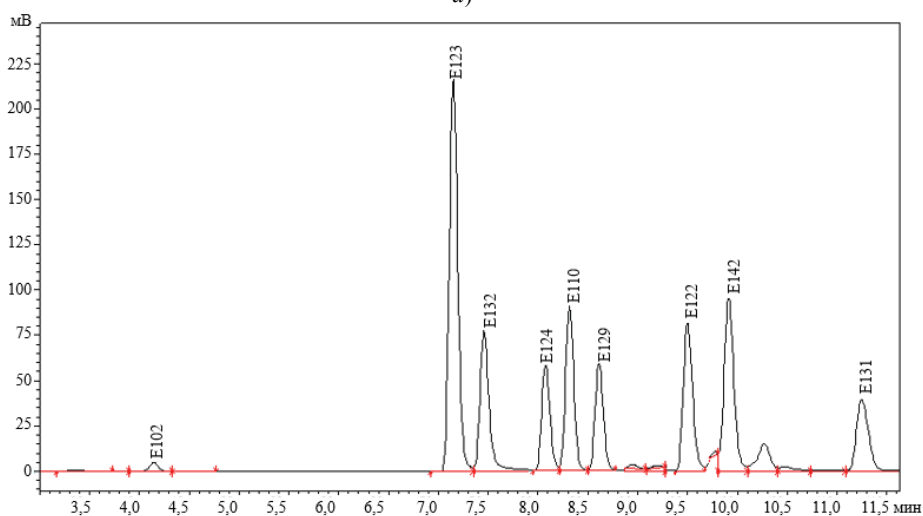
– время хроматографирования – 15 мин;

– объем пробы – 82 мкл;

– время удерживания хроматографических пиков (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Хроматограммы раствора сравнения, включающего комплекс пищевых синтетических красителей в деионизированной воде (а); раствора того же комплекса красителей, в той же концентрации, в матрице биокефира (б)

Результаты анализа считаются достоверными, если соблюдены требования теста «Проверка пригодности хроматографической системы».

Для проверки пригодности хроматографическую систему уравнивали до стабилизации базовой линии.

Раствор хроматографировали для оценки чувствительности; 1 см^3 тартразина E102 и синего патентного V E131 растворяли в дистиллированной воде в колбе на 500 см^3 . Хроматографическая система считалась пригодной, если отношение сигнал/шум пиков красителей составляло не менее 10.

Для проверки пригодности хроматографической системы раствор последовательно хроматографировали не менее пяти раз. Хроматографическая система считается пригодной, если выполняются следующие условия:

- эффективность хроматографической колонки, рассчитанная на основе хроматографических пиков, составляет не менее 5000 теоретических тарелок;
- коэффициент асимметрии хроматографических пиков составляет не более 2,0.
- относительное стандартное отклонение площадей и времени удерживания пиков красителей составляет не более 5,0 %.

Полученные результаты

На типичной хроматограмме (см. рис. 1) показан раствор сравнения, содержащий в деионизированной воде ряд синтетических красителей, и раствор того же комплекса красителей в той же концентрации в матрице образца молочных продуктов. Полноту извлечения из матрицы молочных продуктов, введенных синтетических пищевых красителей оценивали путем последовательной обработки хроматограмм раствора сравнения, содержащего комплекс синтетических пищевых красителей в деионизированной воде, и раствора того же комплекса красителей в той же концентрации, добавленного в матрикс молочного продукта (табл. 1).

Водные растворы синтетических пищевых красителей способны легко проходить сквозь инертный фильтр, размеры пор которого в несколько раз превышают размер частиц любого из образцов красителей, взятых для анализа в растворе. Для вымывания остаточного количества красителей с фильтра достаточно использовать подщелоченную воду, чтобы предотвратить ионизацию сульфонатных групп. Таким образом, потери при пробоподготовке можно объяснить только поглощением красителей матриксами белков в молочных продуктах. То же самое, по-видимому, происходит и при центрифугировании. Таким образом, установлено, что метод измерения, представленный в [7], является некорректным и требует скорейшей оптимизации.

Физико-химические пути, направленные на усиление поглощения красителей из белковых матриц, не нашли должного воздействия, поэтому было решено отказаться от многоступенчатой пробоподготовки, подщелачивая только анализируемые образцы.

Таблица 1

Показатели полноты извлечения пищевых синтетических красителей из матриксов молочной продукции

Краситель	Время удерживания	Полнота извлечения из продукта при 370 нм, %		
		молоко	йогурт	биокефир
E102	6,08 ± 0,05	91,3 ± 0,5	98,3 ± 0,5	90,3 ± 0,6
E123	8,85 ± 0,05	76,9 ± 0,8	72,1 ± 0,8	74,7 ± 0,8
E132	9,10 ± 0,05	90,7 ± 0,6	88,8 ± 0,6	86,5 ± 0,6
E124	9,77 ± 0,05	86,8 ± 0,6	85,3 ± 0,6	86,5 ± 0,6
E110	9,99 ± 0,06	90,7 ± 0,5	93,9 ± 0,5	97,6 ± 0,5
E129	10,26 ± 0,06	99,2 ± 0,5	91,1 ± 0,5	93,7 ± 0,5
E122	11,06 ± 0,07	91,1 ± 0,6	92,7 ± 0,5	92,3 ± 0,5
E142	11,66 ± 0,07	91,1 ± 0,6	86,2 ± 0,6	88,1 ± 0,6
E131	13,15 ± 0,09	98,1 ± 0,5	95,3 ± 0,5	92,1 ± 0,5

Заключение

Эффективность метода высокоэффективной жидкостной хроматографии продемонстрирована при определении содержания синтетических красителей азокрасителей, трифенилметановых и индигокармина в молочных продуктах, разрешенных для использования в пищевой промышленности. Степень извлечения красителей определялась по площадям пиков анализируемых и контрольных образцов 74,7 – 99,2 % для всех типов, взятых для исследования, молочных продуктов. Время удерживания красителей и площади пиков идентичны.

Список литературы

1. Пацовский, А. П. Научно-методические основы аналитического контроля пищевых красителей в алкогольных напитках : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Пацовский Александр Петрович. – Санкт-Петербург, 2002. – 207 с.
2. Глава II. Раздел 22. Требования безопасности пищевых добавок и ароматизаторов [Электронный ресурс] // Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) : утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 28 мая 2010 года № 299. – URL : https://eec.eaeunion.org/comission/departament/depsanmer/regulation/P2_299.php (дата обращения: 12.02.2026).
3. Пацовский, А. П. Современные достижения в области тонкослойной хроматографии / А. П. Пацовский // Мир измерений. – 2013. – № 1. – С. 36–40.
4. ОСТ 10-298–2002. Алкогольные напитки. Методы идентификации и определения содержания синтетических красителей. – Санкт-Петербург : Минсельхоз России, 2002. – 26 с.
5. ГОСТ 32050–2013. Продукты пищевые. Методы идентификации и определения массовой доли синтетических красителей в карамели. – Введ. 2014-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 46 с.
6. ГОСТ 32780–2014. Продукты пищевые. Методы идентификации и определения содержания массовой доли синтетических красителей в замороженных десертах. – Введ. 2016-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
7. ГОСТ Р 53752–2009. Молоко и молочная продукция. Определение содержания консервантов и красителей методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. – Введ. 2011-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 16 с.
8. 4.3. Третичная структура // Глава 4. Структура // Белок [Электронный ресурс]. – URL : http://belok-s.narod.ru/tb_4_3.htm (дата обращения: 12.02.2026).
9. Тепел, А. Химия и физика молока / А. Тепел : пер. с нем. Л. Ф. Теречек – Москва : Пищевая промышленность, 1979. – 623 с.

Isolation and Chromatographic Separation of Synthetic Dyes from Various Dairy Product Matrixes

© A. P. Patsovskiy ¹✉

¹ JSC GosNIIKhimanalit, patsovskiy_ap@mail.ru;
St. Petersburg, Russian Federation

Keywords: proteins; dairy products; synthetic food colors; food adulteration.

Abstract: The influence of dairy product components on the isolation and subsequent determination of azo dyes, triarylmethane dyes, and indigo carmine dyes used to color certain types of food products in the Russian Federation was studied. The influence of dairy product composition on the completeness and selectivity of dye extraction was examined in detail. The following key factors were taken into account: the composition and morphology of protein matrices, the stability of dye solutions, and precipitation methods. The main difficulties of extraction were assessed. The results obtained provide new opportunities for specialists working on methods of operational control of artificial colors in food products.

References

1. Patsovskiy A.P. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, St. Petersburg, 2002, 207 p. (In Russ.)
2. Available at: https://eec.eaeunion.org/comission/department/depsanmer/regulation/P2_299.php (accessed 12 February 2026).
3. Patsovskiy A.P. [Modern advances in thin-layer chromatography], *Mir izmereniy* [The World of Measurements], 2013, no. 1, pp. 36-40. (In Russ., abstract in Eng.)
4. OST 10-298-2002. *Alkohol'nyye napitki. Metody identifikatsii i opredeleniya sodержaniya sinteticheskikh krasiteley* [Alcoholic beverages. Methods for identification and determination of synthetic colorants], St. Petersburg: Minsel'khos Rossii, 2002, 26 p. (In Russ.)
5. GOST 32050-2013. *Produkty pishchevyye. Metody identifikatsii i opredeleniya massovoy doli sinteticheskikh krasiteley v karameli* [Food products. Methods for identification and determination of mass fraction of synthetic colorants in caramel], Moscow: Standartinform, 2014, 46 p. (In Russ.)
6. GOST 32780-2014. *Produkty pishchevyye. Metody identifikatsii i opredeleniya sodержaniya massovoy doli sinteticheskikh krasiteley v zamorozhennykh desertakh* [Food products. Methods for identification and determination of mass fraction of synthetic colorants in frozen desserts], Moscow: Standartinform, 2019, 16 p. (In Russ.)
7. GOST R 53752-2009. *Moloko i molochnaya produktsiya. Opredeleniye sodержaniya konservantov i krasiteley metodom vysokoeffektivnoy zhidkostnoy khromatografii* [Milk and dairy products. Determination of preservatives and colorants by high-performance liquid chromatography], Moscow: Standartinform, 2010, 16 p. (In Russ.)
8. Available at: http://belok-s.narod.ru/tb_4_3.htm (accessed 12 February 2026).
9. Töpel A. *Chemie und Physik der Milch*, Leipzig, 1979, 623 p. (In Germ.)

Isolierung und chromatographische Trennung von synthetischen Farbstoffen aus verschiedenen Milchproduktmatrizen

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss von Milchproduktbestandteilen auf die Isolierung und anschließende Bestimmung von Azofarbstoffen, Triarylmethanfarbstoffen und Indigokarminfarbstoffen untersucht, die in der Russischen Föderation zur Färbung bestimmter Lebensmittel verwendet werden. Der Einfluss der Milchproduktzusammensetzung auf die Vollständigkeit und Selektivität der Farbstoffextraktion sind detailliert analysiert. Wichtige Faktoren sind berücksichtigt: Zusammensetzung und Morphologie der Proteinmatrix, Stabilität der Farbstofflösungen

und Fällungsmethoden. Die größten Schwierigkeiten der Extraktion sind bewertet. Die Ergebnisse eröffnen neue Möglichkeiten für Fachleute, die sich mit Methoden der Betriebskontrolle künstlicher Farbstoffe in Lebensmitteln befassen.

Extraction et séparation chromatographique des colorants synthétiques provenant des différentes matrices des produits laitiers

Résumé: Sont étudiés les effets des composants des produits laitiers sur l'extraction et la détermination ultérieure des colorants azoïques, du triaryl-méthane et de l'indigocarmin utilisés pour colorer certains types de produits alimentaires dans la Fédération de Russie. Sont étudiés en détail les facteurs d'influence de la composition des produits laitiers sur la plénitude et la sélectivité de la sélection des colorants. Les principaux facteurs sont pris en compte: la composition et la morphologie des matrices de protéines, la stabilité des solutions de colorants; les méthodes de dépôt. Les principales difficultés d'allocation sont évaluées. Les résultats offrent de nouvelles possibilités aux spécialistes impliqués dans les méthodes de contrôle opérationnel des colorants artificiels dans les aliments.

Автор: *Пацовский Александр Петрович* – кандидат технических наук, доцент, начальник испытательной химико-аналитической лаборатории (ИХАЛ), АО «ГосНИИхиманалит», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ФЕРРОЗОНДОМ ПРИ ОДНОПОЛЯРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© Д. И. Ильинский¹, Д. А. Гостищев^{1✉}, В. С. Безкоровайный^{1,2}

¹ Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»,
gostdi@yandex.ru;

² кафедры «Электромеханика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный
университет имени Владимира Даля», Луганск, Луганская Народная Республика,
Российская Федерация

Ключевые слова: катушка подмагничивания; компенсационная обратная связь; магнитометр; магнитное поле; феррозонд.

Аннотация: Представлен способ расширения динамического диапазона измерений ферромодуляционных чувствительных сенсоров на основе сердечника из аморфных сплавов, использующих возбуждение однополярными прямоугольными импульсами. Ключевой проблемой, решаемой в работе, является ограниченная зона линейности традиционных ферромодуляционных чувствительных сенсоров, приводящая к значительным погрешностям при измерении сильных и слабых магнитных полей. Предложено решение, заключающееся в реализации активной компенсационной системы с катушкой компенсационного подмагничивания, принципиальное отличие которой – поддержание результирующего магнитного поля на сердечнике не на нулевом уровне, а в фиксированной точке, соответствующей центру условно-линейного участка функции преобразования ферромодуляционного чувствительного сенсора. Техническая реализация включает цифровой контур управления на базе микроконтроллера, который анализирует сигнал рассогласования от амплитудного детектора, преобразованного аналого-цифровым преобразователем, и формирует управляющее воздействие через цифро-аналоговый преобразователь. Отмечено, что точность системы обеспечивается прецизионным измерением тока датчиком и алгоритмом цифровой компенсации дрейфа.

Введение

Расширение динамического диапазона измерений магнитных полей остается критической задачей для современных технологий, охватывающих области от геофизической разведки до медицинской диагностики: в геофизике – необходимость детектирования слабых аномалий на фоне сильных полей рудных тел, в энергетике – контроль токов в высоковольтных шинах и т.д. [1, 2]. Датчик магнитного поля является основным элементом любого магнитометра и предназначен для преобразования магнитной индукции в электрический сигнал. При создании датчиков магнитного поля используются различные физические эффекты, например, Холла, Гаусса, Суля и др. Однако фундаментальные ограничения современных магнитных сенсоров, включая узкий рабочий диапазон, нелинейность преобразования, температурную нестабильность и дрейф нуля, препятствуют созданию универсальных измерительных систем, обеспечивающих высокоточные измерения в широком диапазоне напряженностей магнитных полей [3 – 5].

Цель работы – разработка способа расширения динамического диапазона измерений ферромодуляционных чувствительных сенсоров с помощью компенсационной катушки подмагничивания при однополярном импульсном возбуждении.

Анализ конструкции ферромодуляционных чувствительных сенсоров

Перспективной технологией для создания магнитометра являются ферромодуляционные чувствительные сенсоры (**ФМЧС**) [6, 7]. Работа ФМЧС базируется на изменении магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника под влиянием внешнего магнитного поля. Это фундаментальное отличие от датчиков Холла, которые реагируют на статическое поле [8], позволяющее ФМЧС регистрировать динамические изменения магнитного поля. Благодаря этому сенсоры способны детектировать не только положение, но и деформации объектов. Ключевым элементом ФМЧС служит сердечник из магнитомягкого материала с высокой магнитной проницаемостью, например, пермаллоя, аморфного железа или нанокристаллических сплавов [9 – 11].

Среди важных эксплуатационных преимуществ ФМЧС выделяются:

- нечувствительность к немагнитным загрязнениям: наличие слоев масла, грязи, краски или пыли не искажает результаты измерений, поскольку магнитное поле проникает через такие среды;

- расширенный температурный диапазон: возможность работы при температурах от -100 до $+175$ °С [12] обеспечивает применение ФМЧС в суровых условиях.

Конструктивно ФМЧС содержит обмотку возбуждения, на которую подается однополярный импульсный сигнал, и измерительную катушку, амплитуда которой пропорциональна напряженности магнитного поля. Однако линейность этой зависимости сохраняется лишь в узком диапазоне, после чего сердечник входит в насыщение. Для устранения этого ограничения вводится третья обмотка – катушка компенсационного подмагничивания (**ККП**) (рис. 1).

Система компенсации основана на поддержании постоянного результирующего поля в сердечнике, находящегося в центре условно-линейного участка функции преобразования [13]. На рисунке 2 изображена функция преобразования ФМЧС без применения ККП, снятая с помощью амплитудного детектора.

Формула, определяющая оптимальное значение $H_{ц}$, выглядит следующим образом:

$$H_{ц} = H_{ст} + H_{ККП} ,$$

где $H_{ц}$ – оптимальное значение, соответствующее центру условно-линейного участка функции преобразования, $H_{ц} = 100$ А/м; $H_{ст}$ – измеряемое стороннее магнитное поле; $H_{ККП}$ – прикладываемое магнитное поле ККП.

Для испытаний прототипа магнитометра использован ФМЧС с параметрами ККП: длина 10 мм, медная проволока $\varnothing 0,2$ мм, 2 слоя намотки, 100 витков. При токе компенсации 10 мА создаваемое магнитное поле ККП составило 100 А/м, что соответствует расчетному значению:

$$H_{ККП} = \frac{IW}{L} = \frac{0,01 \cdot 100}{0,01} = 100 \text{ А/м},$$

где I – ток компенсации, А; W – количество витков; L – длина ККП, м.

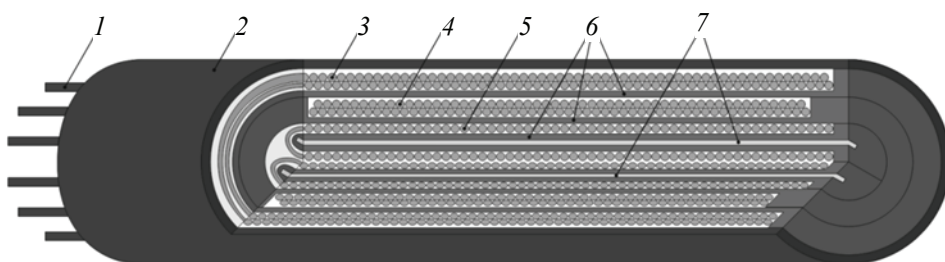


Рис. 1. Схема ферромодуляционного чувствительного сенсора:

1 – выводные контакты; 2 – внешний каркас; 3 – ККП; 4 – измерительная катушка; 5 – обмотка возбуждения; 6 – внутренние каркасы; 7 – ферромагнитные сердечники

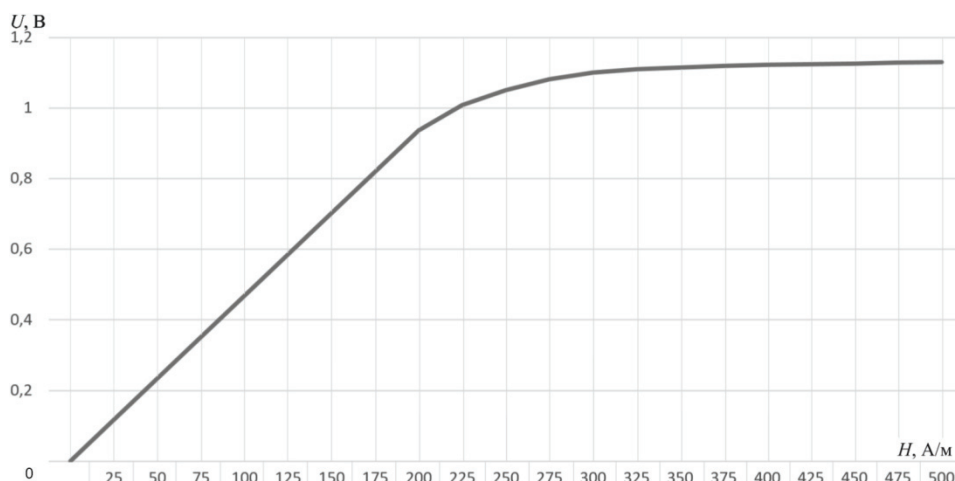


Рис. 2. Функция преобразования ФМЧС без ККП

Принцип работы магнитометра

Техническая реализация работы магнитометра (рис. 3) заключается в непрерывном отслеживании пика амплитуды выходного сигнала ФМЧС и тока компенсации, прикладываемого к ККП.

В состав аппаратной части магнитометра входят: катушка компенсационного подмагничивания 1, ФМЧС 2, генератор однополярных импульсных сигналов (ГС) 3, микроконтроллер (МК) 4, блок индикации (БИ) 5, датчик тока (ДТ) 6, амплитудный детектор (АД) 7, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 8, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 9 и источника тока (ИТ) 10.

Генератор однополярных импульсных сигналов возбуждения [14] служит для создания рабочего переменного магнитного поля ФМЧС. Поскольку ФМЧС реагируют на динамические изменения магнитного потока, его выходной сигнал может изменяться быстро. Для его точного оцифровывания применяется амплитудный детектор, который преобразовывает высокочастотный в низкочастотный модулирующий сигнал, необходимый для минимизации помех и работы АЦП (рис. 4). Алгоритм микроконтроллера непрерывно отслеживает сигнал рассогласования $\Delta U = U_{\text{вых}} - U_{\text{к}}$, где $U_{\text{к}}$ соответствует калиброванному напряжению $H_{\text{ц}}$. Микроконтроллер вычисляет управляющее воздействие для ЦАП, тем самым корректируя работу источника тока. Для более точного расчета генерируемого магнитного поля ККП, микроконтроллер отслеживает истинный протекающий ток с помощью датчика тока.

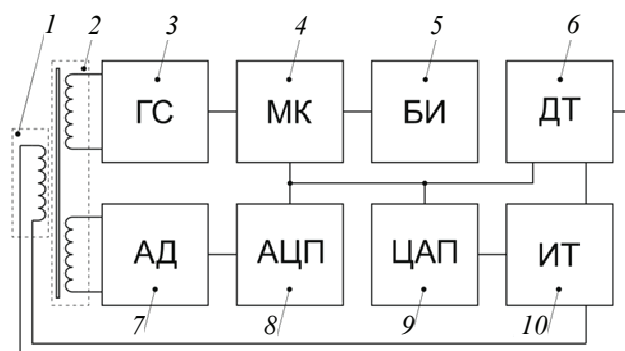


Рис. 3. Схема магнитометра

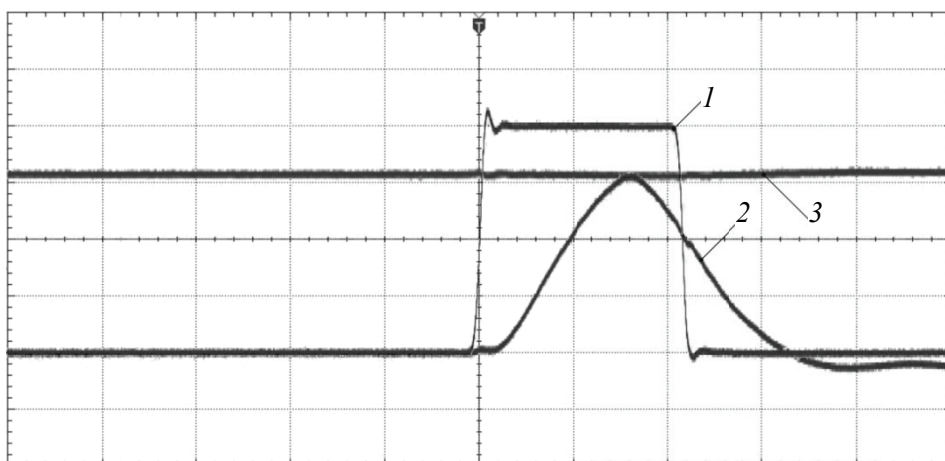


Рис. 4. Осциллограмма преобразования сигнала:
1 – сигнал возбуждения; 2 – выходной сигнал ФМЧС;
3 – низкочастотный сигнал на выходе амплитудного детектора

Анализ полученных результатов

Полученные экспериментальные данные функции преобразования ФМЧС после внедрения ККП, снятые при помощи датчика тока, изображены на рис. 5.

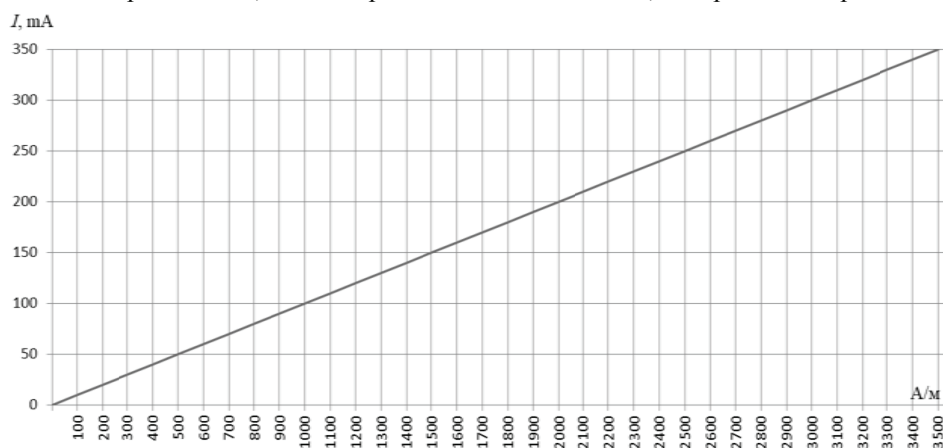


Рис. 5. Функция преобразования ФМЧС с ККП

Тепловой анализ показал, что саморазогрев ККП не превышал 10 °С при токе 0,1 А в течение 60 мин, а алгоритм цифровой компенсации дрейфа снизил дрейзг АЦП, ЦАП и датчика тока в 3 раза.

Чувствительность к слабым полям определяется шумами АЦП, ЦАП и датчиком тока. Применение сердечника из аморфного железа снижает шумы за счет высокой проницаемости и низкой коэрцитивной силы. Быстродействие системы лимитировано индуктивностью ККП, скоростью АЦП, ЦАП и датчиком тока.

Заключение

Предложенная компенсационная схема с фиксацией рабочей точки в центре линейного участка H_c радикально расширила динамический диапазон работы магнитометра на основе ферро модуляционного чувствительного сенсора. Экспериментально подтверждено, что магнитометр с катушкой компенсационного подмагничивания обеспечивает измерение полей в диапазоне ± 3500 А/м при нелинейности менее 2 %. Основное ограничение связано с максимальным током драйвера, определяющим верхнюю границу диапазона, а также температурным рассеиванием катушки компенсационного подмагничивания и внешним каркасом ферро модуляционного чувствительного сенсора. Ключевые преимущества заключаются в простой системе обработки, устойчивости к механическим и температурным перегрузкам, а также возможности использования магнитометра для широкого диапазона измерений магнитных полей.

Список литературы

1. Developments in subsea power and telecommunication cables detection: Part 2 – Electromagnetic detection / T. Szyrowski, S. K. Sharma, R. Sutton, G. A. Kennedy // Underwater Technology. – 2013. – Vol. 31, No. 3. – P. 133–143. doi: 10.3723/ut.31.133
2. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers / P. Ripka. – Boston, MA : Artech House, 2021. – 479 p.
3. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника / М. Л. Бараночников. – Москва : ДМКПресс, 2002. – Т. 2. – 691 с.
4. Magnetometric Localization and Measurement of Hidden AC Currents / V. Grim, J. Pek, P. Ripka and A. Chirtsov // 2019 IEEE SENSORS, Montreal, QC, Canada, 2019. – P. 1–4. doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956513
5. 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.
6. Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers / B. Ando, S. Baglio, A. R. Bulsara, V. Sacco // IEEE Sensors Journal. – 2005. – Vol. 5, No. 5. – P. 895–904. doi: 10.1109/JSEN.2005.853598
7. The noise of the Vacquier type sensors referred to changes of the sensor geometrical dimensions / C. Moldovanu, P. Brauer, O. V. Nielsen, J. R. Petersen // Sensors and Actuators A: Physical. – 2000. – Vol. 81, No. 1-3. – P. 197–199. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00087-4
8. Муратов, Р. Ф. Обзор подкатегории датчиков на эффекте Холла: униполярный датчик на эффекте Холла / Р. Ф. Муратов // Технологическая кооперация науки и производства: новые идеи и перспективы развития : сборник статей Международной науч.-практ. Конф., Воронеж, 01 февраля 2021 года. – Уфа, 2021. – С. 28–29.

9. Афанасьев, Ю. В. Феррозондовые приборы / Ю. В. Афанасьев. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
10. Матюк, В. Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания / В. Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 29–64.
11. Власкин, К. И. Разработка электромагнитных систем малогабаритных первичных преобразователей феррозондового типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Власкин Константин Игоревич. – Уфа, 2016. – 155 с.
12. Nishio, Y. The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite / Y. Nishio, F. Tohyama, N. Onishi // Measurement Science and Technology. – 2007. – Vol. 18, No. 8. – P. 2721–2730. doi: 10.1088/0957-0233/18/8/050
13. Разработка математической модели образования выходного сигнала феррозонда при однополярном импульсном возбуждении / В. С. Безкоровайный, Ю. В. Ливцов, В. В. Яковенко, Н. А. Шатова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 70. – С. 190–197. doi: 10.21667/1995-4565-2019-70-190-197
14. Мирошниченко, О. Н. Функция преобразования феррозонда с однополярным импульсным возбуждением / О. Н. Мирошниченко, А. А. Ивженко, В. В. Яковенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 9(51). – С. 51–55.

Extending the Range of Measured Magnetic Field Values with a Fluxgate under Unipolar Pulsed Excitation

© D. I. Ilyinsky¹, D. A. Gostishchev¹✉, V. S. Bezkorovayny^{1,2}

¹ Youth Research Laboratory “Progress”, gostdi@yandex.ru;

² Department of Electromechanics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk,
Lugansk People's Republic, Russian Federation

Keywords: magnetization coil; compensating feedback; magnetometer; magnetic field; fluxgate.

Abstract: A method for expanding the dynamic measurement range of ferromodulation sensors based on amorphous alloy cores using unipolar rectangular pulse excitation is presented. The key problem addressed in this study is the limited linearity range of traditional ferromodulation sensors, which leads to significant errors when measuring strong and weak magnetic fields. We propose a solution, which involves implementing an active compensation system with a compensating magnetization coil. The fundamental difference is that the resulting magnetic field on the core is maintained not at zero, but at a fixed point corresponding to the center of the conditionally linear portion of the ferromodulation sensor's transfer function. The technical implementation includes a microcontroller-based digital control loop that analyzes the error signal from the amplitude detector, converted by an analog-to-digital converter, and generates a control signal via a digital-to-analog converter. The system accuracy is ensured by precise current measurement by the sensor and a digital drift compensation algorithm.

References

1. Szyrowski T., Sharma S.K., Sutton R., Kennedy G.A. Developments in subsea power and telecommunication cables detection: Part 2 – Electromagnetic detection, *Underwater Technology*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 133-143. doi: 10.3723/ut.31.133
2. Ripka P. *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Boston, MA: Artech House, 2021, 479 p.
3. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagnetoelectronics], Moscow: DMKPress, 2002, vol. 2, 691 p. (In Russ.)
4. Grim V., Pek J., Ripka P. and Chirtsov A. Magnetometric Localization and Measurement of Hidden AC Currents, *2019 IEEE SENSORS*, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956513
5. Baranova V.Ye. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Tomsk, 2015. 18 p. (In Russ.)
6. Ando B., Baglio S., Bulsara A.R., Sacco V. Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers, *IEEE Sensors Journal*, 2005, vol. 5, no. 5, pp. 895-904. doi: 10.1109/JSEN.2005.853598
7. Moldovanu C., Brauer P., Nielsen O.V., Petersen J.R. The noise of the Vacquier type sensors referred to changes of the sensor geometrical dimensions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 81, no. 1-3, pp. 197-199. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00087-4
8. Muratov R.F. *Tekhnologicheskaya kooperatsiya nauki i proizvodstva: novyye idei i perspektivy razvitiya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf.* [Technological Cooperation of Science and Industry: New Ideas and Development Prospects: Collection of Articles from the International Scientific and Practical Conf.], Voronezh, February 1, 2021, Ufa, 2021, pp. 28-29. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Afanas'yev Yu.V. *Ferrozondovyye pribory* [Fluxgate Devices], Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 186 p. (In Russ.)
10. Matyuk V.F. [Magnetic Structuroscopy Devices Based on Local Unipolar Pulsed Magnetization], *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 2, pp. 29-64. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Vlaskin K.I. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Ufa, 2016, 155 p. (In Russ.)
12. Nishio Y., Tohyama F., Onishi N. The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite, *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, no. 8, pp. 2721-2730. doi: 10.1088/0957-0233/18/8/050
13. Bezkorovaynyy V.S., Livtsov Yu.V., Yakovenko V.V., Shatova N.A. [Development of a Mathematical Model for the Formation of a Fluxgate Output Signal with Unipolar Pulsed Excitation], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University], 2019, no. 70, pp. 190-197. doi: 10.21667/1995-4565-2019-70-190-197 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Miroshnichenko O.N., Ivzhenko A.A., Yakovenko V.V. [Conversion Function of a Fluxgate with Unipolar Pulsed Excitation], *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dal'ya* [Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk State University], 2021, no. 9(51), pp. 51-55. (In Russ., abstract in Eng.)

Erweiterung des Messbereichs magnetischer Felder mit einer Ferrosonde unter unipolarer Impulsanregung

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Erweiterung des dynamischen Messbereichs von Ferromodulationssensoren mit Kernen aus amorpher Legierung mittels unipolarer Rechteckimpulsanregung vorgestellt. Das zentrale Problem dieser

Studie ist der begrenzte Linearitätsbereich herkömmlicher Ferromodulationssensoren, der zu erheblichen Messfehlern bei starken und schwachen Magnetfeldern führt. Als Lösung ist ein aktives Kompensationssystem mit einer Kompensationsmagnetisierungsspule vorgeschlagen. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass das resultierende Magnetfeld am Kern nicht auf null, sondern auf einem festen Punkt gehalten wird, der dem Zentrum des bedingt linearen Bereichs der Übertragungsfunktion des Ferromodulationssensors entspricht. Die technische Umsetzung umfasst einen mikrocontrollerbasierten digitalen Regelkreis, der das vom Amplitudendetektor erzeugte und mittels eines Analog-Digital-Wandlers gewandelte Fehlersignal analysiert und über einen Digital-Analog-Wandler ein Steuersignal generiert. Die Genauigkeit des Systems wird durch präzise Strommessung des Sensors und einen digitalen Driftkompensationsalgorithmus gewährleistet.

Extension de la plage des mesure des champs magnétiques par le ferrozond dans une excitation pulsée unipolaire

Résumé: Est présentée une méthode pour étendre la plage dynamique des mesure des capteurs sensibles à la ferromodulation à base de cœur d'alliages amorphes utilisant l'excitation par impulsions droites unipolaires. Un problème clé à résoudre dans le travail est la zone de linéarité limitée des capteurs de ferromodulation traditionnels, ce qui entraîne des erreurs importantes dans la mesure des forces et des champs magnétiques faibles. La solution proposée consiste en mise en œuvre d'un système de compensation actif avec une bobine d'aimantation compensatoire, dont la principale différence est le maintien du champ magnétique résultant sur le noyau non pas à un niveau nul, mais à un point fixe correspondant au centre de la section conditionnellement linéaire de la fonction de pré-formation du capteur sensible à la ferromodulation. La mise en œuvre technique comprend un circuit de commande numérique basé sur un microcontrôleur qui analyse le signal de désalignement d'un détecteur d'amplitude pré-formé par un convertisseur analogique-numérique et forme un effet de commande via un convertisseur numérique-analogique. Il est à noter que la précision du système est assurée par une mesure de courant de précision par le capteur et un algorithme de compensation de dérive numérique.

Авторы: *Ильинский Дмитрий Игоревич* – младший научный сотрудник молодежной научно-исследовательской лаборатории «Прогресс»; *Гостищев Дмитрий Александрович* – лаборант молодежной научно-исследовательской лаборатории «Прогресс»; *Безкоровайный Владимир Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», ведущий научный сотрудник молодежной научно-исследовательской лаборатории «Прогресс», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Луганская Народная Республика, Российская Федерация.

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧКИ В ТЕПЛОВОЙ КАМЕРЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

© А. А. Балашов¹✉, Д. В. Корпусов²

¹ Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»,
balashovalexei@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;

² МУП «Тамбовтеплосервис», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: нечеткая логика; тепловая камера; тепловая сеть; утечка; MATLAB.

Аннотация: Основными параметрами, оказывающими существенное влияние на надежность системы теплоснабжения, являются вероятность безотказной работы и коэффициент готовности, которые зависят от работоспособности тепловых камер на тепловых сетях. Контроль утечек в тепловых камерах зависит от многих факторов, а именно от таких параметров, как температура и влажность внутреннего воздуха, уровень воды. Разработаны принципы построения контроля утечки в тепловой камере на основе нечеткой логики, модель нечеткой логики, выполненная с использованием пакета прикладных программ MATLAB, основанная на алгоритме Мамдани. Рассмотренный метод контроля позволяет определить аварийную ситуацию при утечке теплоносителя в тепловой камере по таким параметрам, как температура и влажность внутреннего воздуха, а также уровень воды.

Введение

Основная цель надежности системы теплоснабжения — бесперебойное снабжение потребителей тепловой энергией и теплоносителями в течение заданного периода, недопущение опасных для людей и окружающей среды ситуаций. Под надежностью теплоснабжения понимают способность действующих и проектируемых тепловых сетей обеспечивать в течение заданного времени требуемые режимы, параметры и качество теплоснабжения (отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, а также технологических потребностей предприятий в паре и горячей воде) [1]. В свою очередь, тепловая сеть состоит из наружной системы, которая включает котельные, трубопроводы, тепловые пункты и тепловые камеры, а также внутренней системы — трубы, радиаторы, батареи, смесительные устройства, сантехнические приборы и запорную арматуру. В каждой из этих систем возможны утечки, которые приводят к перерасходу энергии и могут стать причиной возникновения аварийной ситуации, представляющей опасность для жизни людей. Основные причины утечек: нарушение герметичности соединений в результате коррозии труб, износа прокладок или ослабления резьбовых соединений; термическое расширение и сужение фитингов и т.п. Поэтому обнаружение утечек в тепловых камерах на тепловых сетях системы теплоснабжения является одной из актуальных и важных задач для жилищно-коммунального хозяйства России [2].

Цель работы – разработка подходов применения аппарата нечетких множеств в задаче обнаружения утечки в тепловой камере системы теплоснабжения.

Постановка задачи

В системе теплоснабжения возможны утечки теплоносителя вследствие коррозии труб, разгерметизации соединения и механических повреждений, которые могут возникать в процессе эксплуатации и при гидравлических испытаниях трубопроводов. Раннее обнаружение утечек критически важно для предотвращения техногенных аварий, снижения потерь тепловой энергии и минимизации затрат на восстановительный ремонт.

Пусть даны следующие измеряемые (входные) параметры в случае утечки теплоносителя в тепловой камере системы теплоснабжения, наиболее релевантные для прямого мониторинга микроклимата внутри тепловой камеры: изменения температуры воздуха внутри тепловой камеры $T(\tau)$, влажности воздуха $\varphi(\tau)$ и уровня воды $U(\tau)$, в случае утечки, в тепловой камере (рис. 1). Выходным параметром является вероятность утечки $L(\tau)$ с изменением в диапазоне $[0, 1]$. Также имеются следующие неопределенности: зашумленность данных, нелинейная зависимость параметров и субъективность в оценке «нормальных» значений.

На рисунке 1 представлена схема системы нечеткого контроля уровня воды в тепловой камере. Модель включает следующие основные компоненты:

1) объект контроля – тепловая камера, где осуществляется мониторинг и регулирование уровня воды. Входными параметрами для контроля являются изменения температуры воздуха внутри тепловой камеры $T(\tau)$, влажности воздуха $\varphi(\tau)$ и уровня воды $U(\tau)$;

2) система нечеткого контроля – блок, реализующий алгоритмы нечеткой логики для обработки входных данных и принятия решений;

3) ЛПР (лицо, принимающее решения) – может интерпретироваться как оператор или программный модуль, который на основе выходных данных системы нечеткого контроля вносит корректировки в работу тепловой камеры.

Схема иллюстрирует замкнутый цикл управления, где нечеткая логика обеспечивает адаптивное регулирование параметров в условиях неопределенности и изменяющихся внешних условий. Данная модель демонстрирует эффективность применения методов нечеткого контроля в задачах управления технологическими процессами. Требуется построить систему нечеткого контроля, которая анализирует изменения (T, φ, U) в реальном времени τ , а также оценивает вероятность утечки $L(\tau) \in [0, 1]$ и принимает решение о наличии утечки при $L(\tau) \geq \theta$, где θ – порог срабатывания.

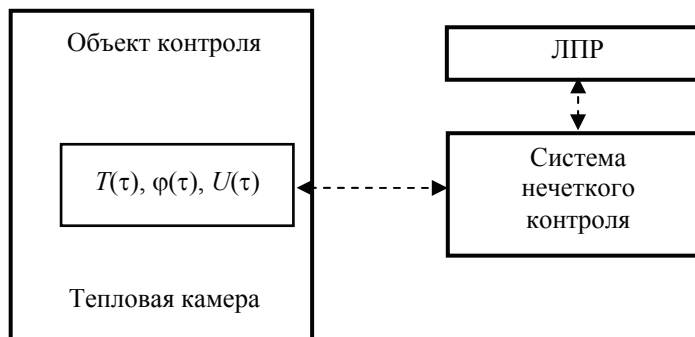


Рис. 1 Модель нечеткого контроля уровня воды в тепловой камере

Целевая функция в данной задаче должна отражать оптимальность работы системы обнаружения утечки, минимизировать ложные срабатывания и пропуски реальных утечек.

Формализация целевой функции, как взвешенная сумма ошибок, будет иметь следующий вид:

$$J(\omega_1, \omega_2) = \omega_1 \text{FP} + \omega_2 \text{FN} \rightarrow \min ,$$

где ω_1, ω_2 – весовые коэффициенты, отражающие важность минимизации ложных срабатываний и пропусков утечек соответственно; FP (англ. False Positive) – ложное срабатывание (ошибка 1-го рода); FN (англ. False Negative) – пропуск утечки (ошибка 2-го рода).

Далее опишем уточненную целевую функцию с учетом нечеткой логики. Если модель выдает степень уверенности в утечке $L(\tau) \in [0, 1]$, то можно ввести порог срабатывания θ и определить

$$\begin{cases} \text{FP} = \sum I(L_i \geq \theta \text{ при отсутствии утечки}), \\ \text{FN} = \sum I(L_i < \theta \text{ при наличии утечки}), \end{cases}$$

где I – функция Хевисайда или функция-индикатор.

Тогда

$$J(\theta, \omega_1, \omega_2) = \omega_1 \text{FP}(\theta) + \omega_2 \text{FN}(\theta) \rightarrow \min_{\theta}.$$

В случае, если требуется оптимизация параметров модели, то можно добавить регуляризацию

$$J = \omega_1 \text{FP} + \omega_2 \text{FN} + \lambda C(M) \rightarrow \min_M ,$$

где $C(M)$ – мера сложности модели, например количество правил; λ – коэффициент регуляризации. Основной задачей коэффициента регуляризации является предотвращение переобучения, то есть ситуация, когда модель слишком хорошо подстраивается под обучающие данные и плохо работает с новыми. Если $\lambda = 0,01$, то модель может использовать 20 правил, а если $\lambda = 0,1$ – 5 – 10 самых важных правил. Таким образом, регуляризация упрощает модель и делает ее более устойчивой к шумам.

В нашем случае, с использованием входных и выходных параметров целевая функция будет иметь следующий вид:

$$J(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \omega_1 \text{FP} + \omega_2 \text{FN} + \omega_3 \tau_{\text{задерж}} \rightarrow \min_{M, \theta} , \quad (1)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – весовые коэффициенты, отражающие важность минимизации ложных срабатываний, пропусков утечек и времени между началом утечки и ее обнаружением; $\tau_{\text{задерж}}$ – время между началом утечки и ее обнаружением;

M – структура нечеткой модели (функции принадлежности, правила).

Несмотря на свою практическую ценность, модель (1), как и любой упрощенный подход, сталкивается с ограничениями при работе с реальными условиями, где распределение параметров микроклимата по площади и глубине камеры, а также субъективные экспертные оценки играют ключевую роль. В частности, задачи обнаружения утечек часто требуют учета не только количественных данных, но и качественных суждений экспертов, основанных на многолетнем опыте. Именно здесь на первый план выходит аппарат нечеткой логики, способный формализовать подобные эвристики. Этот математический инструмент, в отличие от

классических методов, позволяет перевести интуитивные понятия, такие как «высокая температура» или «средний уровень воды», в алгоритмически интерпретируемые правила, что критически важно для создания адаптивных систем управления в условиях неполной информации и пространственной неоднородности параметров.

Современные алгоритмы нечеткого логического вывода реализуются в рамках единой методологической схемы, включающей последовательность обязательных этапов обработки данных: формирование базы нечетких правил – построение системы продукционных правил вида «ЕСЛИ < антецедент >, ТО < консеквент >», где антецедент и консеквент выражаются в терминах лингвистических переменных; процедура фазификации – преобразование четких входных значений в степени принадлежности к соответствующим нечетким множествам на основе заданных функций принадлежности; агрегирование антецедентов – вычисление общей степени истинности условия для каждого правила путем применения операций нечеткой логики ($\min$ для конъюнкции, $\max$ для дизъюнкции); активация подзаключений – определение результирующей формы функции принадлежности вывода на основе степени выполнения правила (методы $\min$ -активации или product -активации); аккумулярование выходных нечетких множеств – объединение модифицированных функций принадлежности всех активированных правил в результирующее нечеткое множество (операция $\max$ или аддитивная свертка); дефазификация – преобразование агрегированного нечеткого вывода в количественное значение посредством методов центра тяжести, среднего максимума или иных критериев.

Нечеткая модель обнаружения утечки в тепловой камере

В практике проектирования систем нечеткого вывода наибольшее распространение получили следующие алгоритмы: Мамдани, Цукамото, Сугено и Ларсена [3]. Каждый из них обладает специфическими особенностями, которые описаны ниже: в алгоритме Цукамото консеквенты правил задаются монотонными (возрастающими или убывающими) функциями, что отличает его от других методов при сохранении общей структуры вывода; алгоритм Сугено характеризуется использованием линейных комбинаций входных переменных в заключениях правил, что упрощает вычислительную процедуру; в методе Ларсена активация подзаключений осуществляется посредством prod -активации (умножения), формируя модифицированные нечеткие множества для последующего агрегирования.

Выбор конкретного алгоритма определяется требованиями задачи, структурой базы правил и видом функций принадлежности. В представленном исследовании использован алгоритм Мамдани с дефазификацией методом центра тяжести или центра площади, как наиболее универсальный и интуитивно понятный подход.

Далее представим в виде табл. 1 базу правил для детектирования утечек в тепловой камере. Для решения задачи обнаружения утечек в системе теплоснабжения разработана следующая система продукционных правил ($\Pi_1 - \Pi_{14}$), связывающих лингвистические переменные (**ЛП**) (температуру, уровень, влажность) с вероятностью утечки. Введены ЛП температуры воздуха; уровня воды; влажности воздуха и вероятности утечки с оценкой – низкая, средняя, высокая

На этапе фазификации осуществляется преобразование четких входных данных (например, измеренных значений температуры, уровня и влажности) в степени принадлежности к соответствующим термам лингвистических переменных. Это выполняется на основе заданных функций принадлежности (треугольных, трапецевидных, гауссовых и др.), параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 1

База правил для детектирования утечек
в тепловой камере

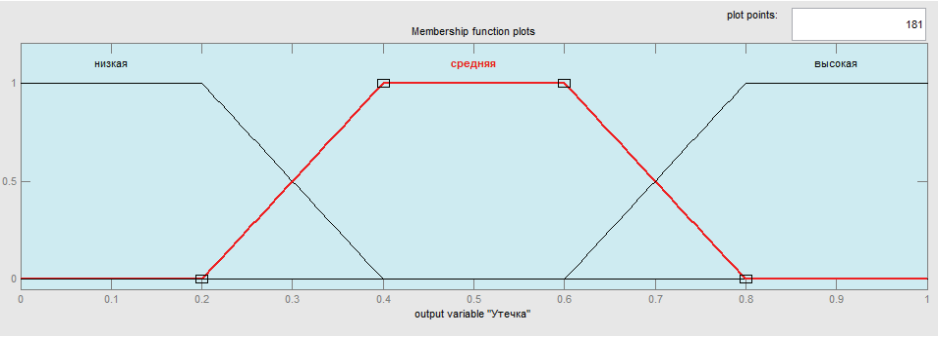
Правило	Антецедент	Консеквент
П ₁	температура = высокая И уровень = высокий	вероятность утечки = высокая
П ₂	температура = низкая И уровень = низкий	вероятность утечки = низкая
П ₃	температура = низкая И уровень = средний	вероятность утечки = средняя
П ₄	температура = низкая И уровень = высокий	вероятность утечки = средняя
П ₅	температура = средняя И уровень = высокий	вероятность утечки = высокая
П ₆	влажность = высокая И температура = высокая	вероятность утечки = высокая
П ₇	влажность = низкая И температура = низкая	вероятность утечки = низкая
П ₈	влажность = средняя И температура = средняя	вероятность утечки = средняя
П ₉	влажность = высокая И температура = низкая	вероятность утечки = низкая
П ₁₀	влажность = высокая И температура = средняя	вероятность утечки = средняя
П ₁₁	влажность = высокая И уровень = высокий	вероятность утечки = высокая
П ₁₂	влажность = низкая И уровень = низкий	вероятность утечки = низкая
П ₁₃	влажность = средняя И уровень = низкий	вероятность утечки = низкая
П ₁₄	влажность = высокая И уровень = средний	вероятность утечки = средняя

Таблица 2

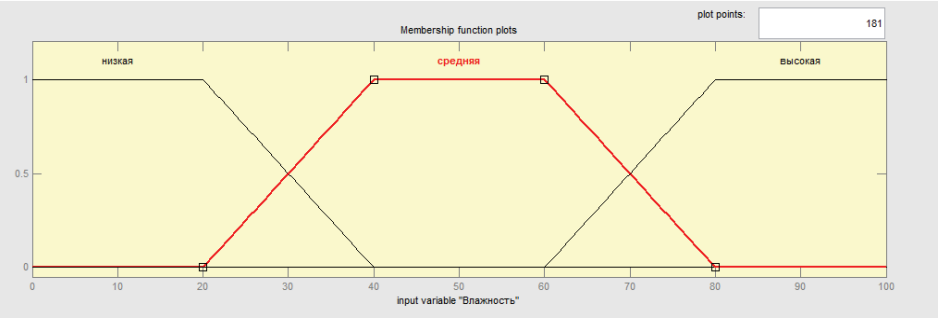
Значения параметров лингвистических переменных

Параметр	Значение параметров		
	низкое	среднее	высокое
Температура воздуха в колодце, °C	5...20	20...80	80...110
Уровень воды в колодце, м	0...0,2	0,2...1,4	1,4...2
Влажность в колодце, %	0...20	20...60	60...100
Вероятность утечки	0...0,2	0,2...0,6	0,6...1,0

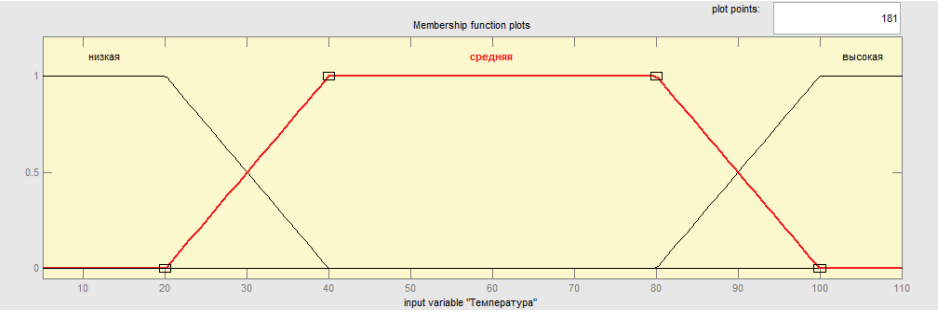
Графики функций принадлежности μ_P ЛП вероятности утечки, влажности воздуха, температуры воздуха, уровня воды в тепловой камере приведены на рис. 2. В рамках рассматриваемого примера выбраны трапециевидные функции принадлежности, что обусловлено их широким применением в задачах нечеткого моделирования благодаря балансу между точностью и вычислительной простотой. Как отмечается в литературе [3, 4], существует множество методов определения функций принадлежности, однако оптимальный выбор зависит от специфики решаемой задачи. В данном случае предпочтение отдано одному из наиболее простых подходов, что позволяет наглядно продемонстрировать принципы нечеткого логического вывода без избыточного усложнения модели.



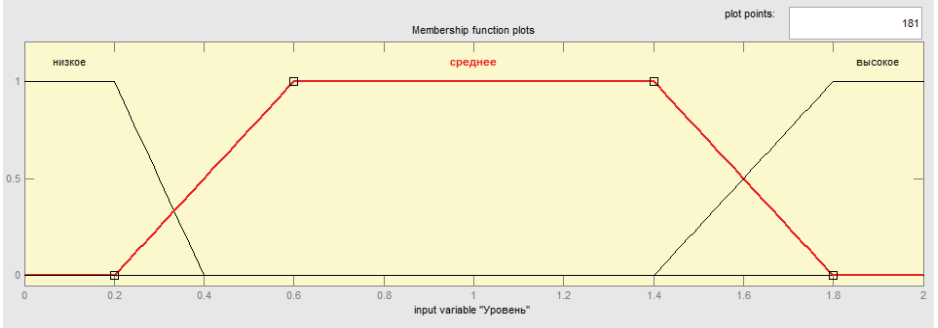
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Функции принадлежности ЛП:
 вероятности утечки (а), влажности воздуха (б), температуры воздуха (в),
 уровня воды в тепловой камере (г)

Далее представим процедуру фазификации входных параметров.

При текущей относительной влажности воздуха, составляющей 75 %, процедура фазификации позволила определить степени истинности для элементарных нечетких высказываний:

- «влажность воздуха низкая» – 0,00;
- «влажность воздуха средняя» – 0,25;
- «влажность воздуха высокая» – 0,75.

Аналогично, для температуры воздуха 95 °С получены следующие значения:

- «температура воздуха низкая» – 0,00;
- «температура воздуха средняя» – 0,25;
- «температура воздуха высокая» – 0,75.

Для уровня воды 1,7 м вычислены степени истинности:

- «уровень воды низкий» – 0,00;
- «уровень воды средний» – 0,25;
- «уровень воды высокий» – 0,75.

Агрегирование подусловий представляет собой процесс определения степени истинности составных условий для каждого правила нечеткого вывода. Каждое подусловие вида «β есть α» (например, «режим – квазистационарный») анализируется с использованием функции принадлежности $\mu_\alpha(x)$, где четкое значение входной переменной выступает в качестве аргумента. В данном случае агрегирование выполняется на основе операции нечеткой конъюнкции (логического «И»), что соответствует минимаксному подходу Заде:

$$\mu_{a_i \cap a_j}(x) = \min(\mu_{a_i}(x); \mu_{a_j}(x)),$$

где $\mu_{a_i \cap a_j}$ – результирующая степень истинности агрегированных подусловий a_i и a_j .

Далее приведем пример вычисления степеней истинности антецедентов. На основании результатов фазификации рассчитаны степени истинности для антецедентов правил системы нечеткого вывода, регулирующей контроль утечки в тепловой камере, представленные в табл. 3.

На этапе активации определяется степень истинности заключений каждого правила, а также формируются функции принадлежности для выходных переменных. В практике нечеткого вывода применяются следующие методы активации: min-активация (использование минимального значения); prod-активация (перемножение степеней принадлежности); average-активация (усреднение значений).

При min-активации функция принадлежности выходного термина ограничивается степенью истинности антецедента

$$\mu_{\text{акт}}(x) = \min(\mu(x), c),$$

где $\mu(x)$ – функция принадлежности термина выходной переменной, c – степень истинности антецедента.

Приведем примеры активации для следующих выбранных правил:

– ПРАВИЛО <1>: если «температура высокая» И «уровень высокий», то «вероятность утечки высокая». Поскольку $c_{12}(x) = 0,75$, результирующая функция принадлежности $\mu_{P(x)}$ ограничена значением 0,75;

– ПРАВИЛО <5>: если «температура средняя» И «уровень высокий», то «вероятность утечки средняя». При $c_{13}(x) = 0,25$ функция принадлежности $\mu_{P(x)}$ принимает максимальное значение 0,25.

Аккумуляция представляет собой процесс объединения функций принадлежности, полученных из различных правил, для формирования итогового нечеткого множества выходной переменной (в данном случае – вероятности утечки). Результат данного этапа визуализирован на рис. 3, где отражена совокупная функция принадлежности после агрегации всех релевантных подзаключений.

Степень истинности для антецедентов правил системы нечеткого вывода

Правило	Антецедент	Степеней истинности
<1>	температура = высокая И уровень = высокий	$\min \{0,00; 0,00\} = 0$
<2>	температура = низкая И уровень = низкий	$\min \{0,00; 0,00\} = 0,00$
<3>	температура = низкая И уровень = средний	$\min \{0,00; 0,25\} = 0,00$
<4>	температура = низкая И уровень = высокий	$\min \{0,00; 0,75\} = 0,00$
<5>	температура = средняя И уровень = высокий	$\min \{0,25; 0,75\} = 0,25$
<6>	влажность = высокая И температура = высокая	$\min \{0,75; 0,75\} = 0,75$
<7>	влажность = низкая И температура = низкая	$\min \{0,00; 0,00\} = 0,00$
<8>	влажность = средняя И температура = средняя	$\min \{0,25; 0,25\} = 0,25$
<9>	влажность = высокая И температура = низкий	$\min \{0,75; 0,00\} = 0,00$
<10>	влажность = высокая И температура = средняя	$\min \{0,75; 0,25\} = 0,25$
<11>	влажность = высокая И уровень = высокий	$\min \{0,75; 0,75\} = 0,75$
<12>	влажность = низкая И уровень = низкий	$\min \{0,00; 0,00\} = 0,00$
<13>	влажность = средняя И уровень = низкий	$\min \{0,25; 0,00\} = 0,00$
<14>	влажность = высокая И уровень = средний	$\min \{0,75; 0,25\} = 0,25$

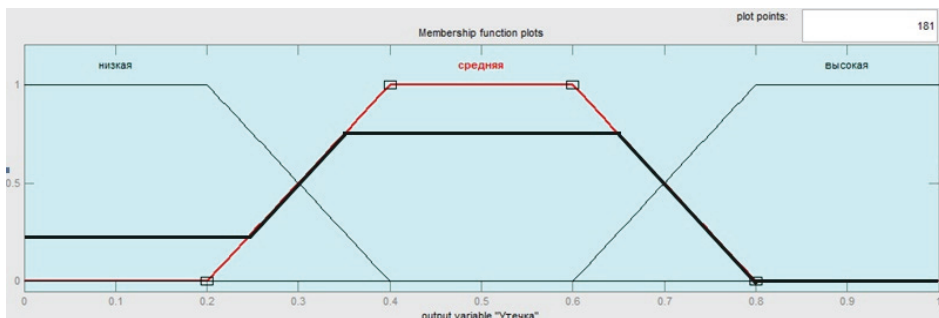


Рис. 3. Зависимость функции принадлежности итоговой вероятности от вероятности утечки

Дефазификация представляет собой критически важный этап обработки нечетких данных, заключающийся в преобразовании агрегированной выходной функции принадлежности $\mu(y)$ в детерминированное значение $y^* \in Y$, где Y – универсальное множество выходной переменной. В контексте рассматриваемой задачи управления технологическим процессом, объектом дефазификации выступает лингвистическая переменная «Вероятность утечки» с терм-множеством $T = (\text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»})$.

Далее приведем формализацию методов дефазификации в виде метода центра тяжести, метода центра площади, методов максимизации. Метод центра тяжести может быть представлен для непрерывной функции

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu(y) dy},$$

где $y_{\min}, y_{\max}$ – границы носителя функции принадлежности; $\mu(y)$ – агрегированная функция принадлежности выходной переменной.

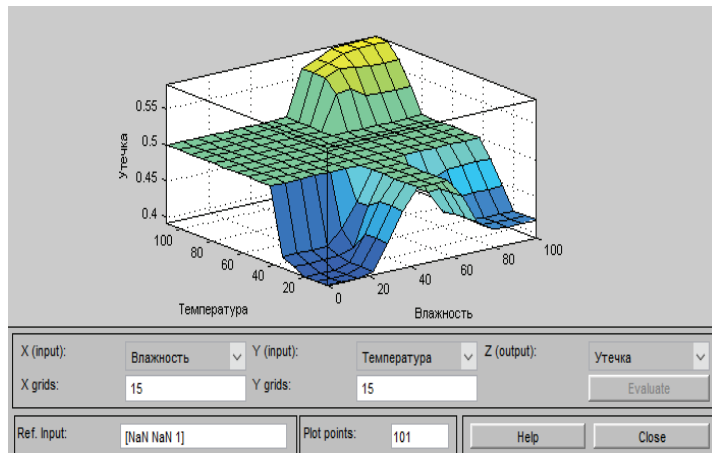
Метод центра площади может быть представлен для непрерывной функции

$$y^* = \arg \min_y \left| \int_{y_{\min}}^y \mu(y) dy - \int_y^{y_{\max}} \mu(y) dy \right|.$$

Для данной задачи оптимальным методом является метод центра тяжести, который обеспечивает минимальную среднеквадратичную ошибку, физическую интерпретируемость результатов, а также устойчивость к параметрическим возмущениям.

По результатам нечеткого логического вывода получена поверхность «входы-выход», отображающая динамику вероятности возникновения того или иного показателя (рис. 4).

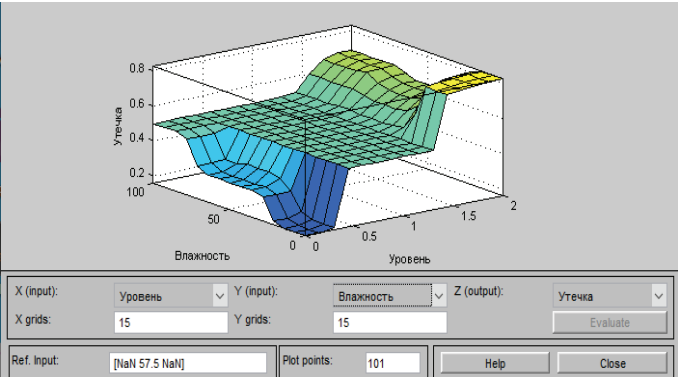
Дадим оценку разработанной системы нечеткого вывода для задачи автоматического контроля обнаружения утечек (рис. 5, а). Здесь рассматривается минимальный случай возможности утечки, когда температура воздуха 20 °С, влажность в камере составляет 20 %, а уровень воды находится на отметке 0,2 м. После ввода этих значений MATLAB выполняет процедуру нечеткого вывода на основе разработанной модели. В результате система выдает значение выходной переменной «вероятность утечки», равное 0,161. Это значение отправляется лицу, принимающему решения, для дальнейшей обработки. Также рассматривается максимальный случай возможности утечки, когда температура воздуха 100 °С, влажность в камере составляет 100 %, а уровень воды находится на отметке 2 м (рис. 5, б). В результате система выдает значение выходной переменной «вероятность утечки», равное 0,839. Это значение также отправляется лицу, принимающему решения, для дальнейшей обработки.



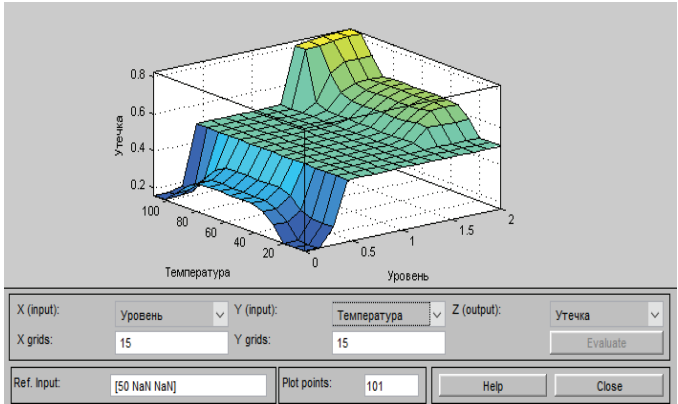
а)

Рис. 4. Зависимости вероятности утечки (начало):

а – от температуры и влажности воздуха при фиксированном уровне воды

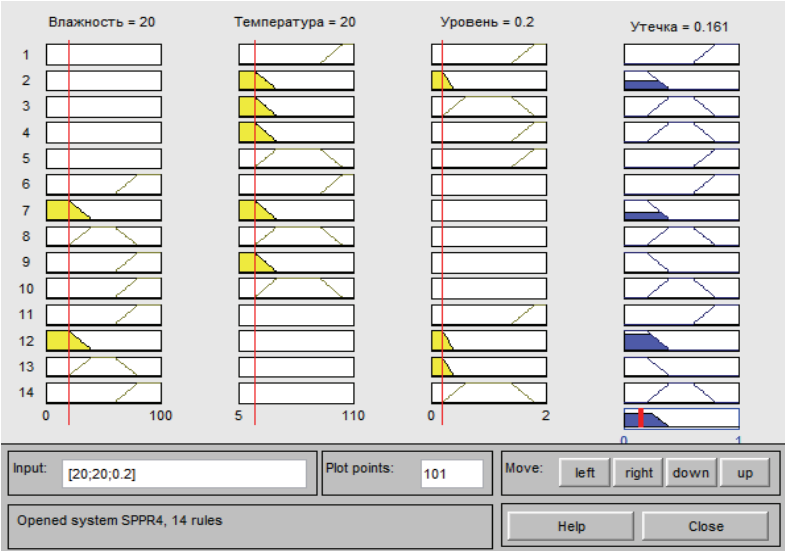


б)



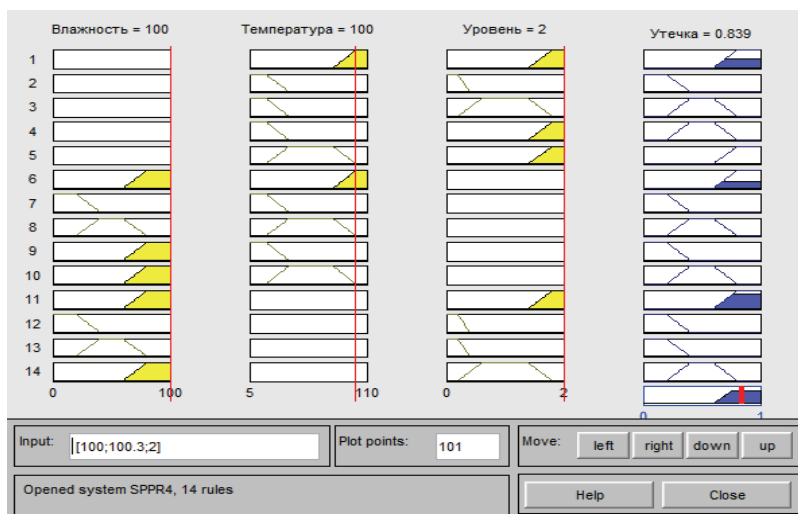
в)

Рис. 4. Зависимости вероятности утечки (окончание):
 б – от влажности воздуха и уровня воды при фиксированной температуре воздуха
 в – от температуры воздуха и уровня воды при фиксированной влажности воздуха.



а)

Рис. 5. Дефазификация с использованием метода тяжести при минимальной утечке в тепловой камере(а) (начало)



б)

Рис. 5. При максимальной утечке (б) (окончание)

Программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода позволяет просматривать поверхность системы нечеткого вывода и визуализировать графики зависимости выходных переменных от отдельных входных величин.

Заключение

Проведенное исследование выявило существенную вариативность реализации этапов нечеткого логического вывода, детерминируемую выбором типа функций принадлежности, операторов агрегирования, а также методов дефазификации. Для задач диагностики технологических процессов алгоритм Мамдани, продемонстрировал преимущества за счет прозрачной интерпретации лингвистических правил, устойчивости к неполноте входных данных и возможности интеграции с экспертной системой.

Список литературы

1. Корпусов, Д. В. Повышение надежности теплоснабжения при эксплуатации тепловой сети / Д. В. Корпусов, А. А. Балашов, А. П. Королев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 594–604. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.594-604
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612529 Российская Федерация. Методика расчета показателей надежности тепловой сети : № 2024610082 : заявл. 10.01.2024 : опубл. 01.02.2024 / А. А. Балашов, Д. В. Корпусов ; заявитель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».
3. Агиней, Р. В. Разработка подходов применения аппарата нечетких множеств в задаче обнаружения утечки в трубопроводе / Р. В. Агиней, К. И. Шмаков, А. С. Казак // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 11(604). – С. 5 – 13. doi: 10.33285/2782-604X-2023-11(604)-5-13
4. Афанасьева, Т. В. Концептуальная модель гибридной системы анализа нечетких временных рядов / Т. В. Афанасьева, С. Г. Валеев, Н. Г. Ярушкина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2008. – № 4-2(14). – С. 85–90.

Development of Approaches for Fuzzy Set Methods to Detect Leaks in a Heat Chamber of a Supply System

© A. A. Balashov¹✉, D. V. Korpusev²

¹ Department of Energy Supply and Heat Engineering, balashovalexei@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russian Federation;

² Municipal Unitary Enterprise "Tambovteploservis", Tambov, Russian Federation

Keywords: fuzzy logic; heat chamber; heat network; leak; Matlab.

Abstract: The main parameters that significantly influence the reliability of a heat supply system are the probability of failure-free operation and the availability factor, which depend on the operability of heat chambers in heat networks. Leak monitoring in thermal chambers depends on many factors, including indoor air temperature and humidity, and water level. Principles for constructing leak monitoring in thermal chambers based on fuzzy logic have been developed, along with a fuzzy logic model implemented using MATLAB software and based on the Mamdani algorithm. This monitoring method allows for the detection of a coolant leak in a thermal chamber based on parameters such as indoor air temperature, humidity, and water level.

References

1. Korpusev D.V., Balashov A.A., Korolev A.P. [Improving the reliability of heat supply during operation of a heating network], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 594–604. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.594-604 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Balashov A.A., Korpusev D.V. *Metodika rascheta pokazateley nadezhnosti teplovoy seti* [Methodology for Calculating Heating Network Reliability Indicators], Russian Federation, 2024, Certificate No. 2024612529 (In Russ.)
3. Aginey R.V., Shmakov K.I., Kazak A.S. [Development of approaches for applying the fuzzy set apparatus to the problem of pipeline leak detection], *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the fuel and energy complex], 2023, no. 11(604), pp. 5-13. doi: 10.33285/2782-604X-2023-11(604)-5-13 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Afanas'yeva T.V., Valeyev S.G., Yarushkina N.G. [Conceptual Model of a Hybrid System for Fuzzy Time Series Analysis], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2008, no. 4-2(14), pp. 85-90. (In Russ., abstract in Eng.)

Entwicklung von Ansätzen zur Anwendung von Fuzzy-Set-Methoden bei der Lecksuche in der Wärmekammer eines Wärmeversorgungssystems

Zusammenfassung: Die Zuverlässigkeit eines Heizsystems wird maßgeblich durch die Ausfallrate und den Verfügbarkeitsfaktor beeinflusst, welche wiederum von der Funktionsfähigkeit der Wärmespeicher in Heiznetzen abhängen. Die Überwachung von Leck in Wärmespeichern ist von zahlreichen Faktoren abhängig, darunter Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wasserstand. Es sind Prinzipien für die

Leckage Überwachung in Wärmespeichern auf Basis von Fuzzy-Logik entwickelt und ein Fuzzy-Logik-Modell implementiert, das auf dem Mamdani-Algorithmus basiert und mit MATLAB realisiert worden ist. Dieses Überwachungsverfahren ermöglicht die Erkennung von Kühlmittleckagen in Wärmespeichern anhand von Parametern wie Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wasserstand.

Élaboration d'approches d'application de l'appareil à ensembles flous dans la tâche de la détection de fuite dans la chambre thermique du système d'alimentation en chaleur

Résumé: Les principaux paramètres qui ont un impact significatif sur la fiabilité du système de chauffage sont la probabilité de disponibilité et le facteur de disponibilité, qui dépendent de la capacité de fonctionnement des chambres thermiques sur les réseaux thermiques. Le contrôle des fuites dans les chambres thermiques dépend de nombreux facteurs, à savoir des paramètres tels que la température et l'humidité de l'air intérieur, le niveau d'eau. Sont élaborés des principes pour la construction du contrôle des fuites dans la chambre thermique basés sur la logique floue, un modèle de logique floue réalisé à l'aide du système de programme MATLAB, basé sur l'algorithme de Mamdani. La méthode de contrôle considérée permet de déterminer la situation d'urgence en cas de fuite du liquide de refroidissement dans la chambre thermique, par des paramètres tels que la température et l'humidité de l'air intérieur, ainsi que le niveau d'eau.

Авторы: *Балашов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Корпусов Дмитрий Владимирович* – ведущий инженер участка допуска и контроля отдела режимов службы сбыта, МУП «Тамбовтеплосервис», Тамбов, Россия.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА БИОЭТАНОЛА В РЕСПУБЛИКЕ ИРАК

© Мохаммед Сукина Джалал Мохаммед¹, А. Н. Пахомов²✉,
Н. Ц. Гатапова², Ю. В. Пахомова²

¹ Технологический университет, Багдад, Республика Ирак;

² кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
panpost@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: выход биоэтанола; глюкоза; методика расчета; производительность; региональное сырье; топливный рынок; фруктоза.

Аннотация: Обоснована возможность производства биоэтанола в качестве добавки к топливу в условиях Республики Ирак. Приведены сводные статистические данные по основным странам-потребителям моторного топлива. Рассмотрены объемы потребления бензина, выявлены ключевые факторы, влияющие на динамику топливного рынка. Представлен обзор перспективной региональной сырьевой базы Республики Ирак. На основе инженерной методики определения выхода этанола из сахарного сырья, выполнены расчеты для видов сырья, перспективных для культивирования и переработки в условиях Ирака. Приведены количественные показатели выхода биоэтанола, оценена технологическая целесообразность его производства из местного сырья.

Введение

Республика Ирак традиционно зависит от нефтегазового сектора, который обеспечивает более 60 % ВВП, около 90 % доходов бюджета и свыше 99 % экспортных поступлений. Однако страна сталкивается с нехваткой бензина и вынуждена импортировать его. Биоэтанол может частично компенсировать этот дефицит, снизив зависимость от импорта и улучшив энергетическую безопасность [1].

В 2009 году премьер-министр Нури аль-Малики одобрил проект по производству биоэтанола из фиников, разработанный специалистами из Алжира и ОАЭ. По оценкам данного проекта, из 100 т фиников можно получить около 35 т биотоплива. Это могло бы стать альтернативой традиционным источникам топлива, особенно в условиях колебаний мировых цен на нефть. Однако производства биоэтанола в Ираке сопряжено с рядом специфических особенностей, таких как технологические проблемы, климатические и почвенные ограничения, конкуренция с нефтяным сектором и сохраняющаяся политическая нестабильность в регионе.

В Ираке недостаточно развита инфраструктура для производства и распределения биоэтанола. Требуется модернизация сельскохозяйственного сектора, строительство перерабатывающих заводов и логистических цепочек. В некоторых регионах наблюдаются засоленность почв, засуха и необходимость орошения. При этом использование сельскохозяйственных земель под производство топлива

может привести к росту цен на продовольствие и обострению проблем с продовольственной безопасностью, что на фоне доминирования нефтегазовой отрасли затрудняет привлечение инвестиций в альтернативные источники энергии [2].

При этом развитие сектора производства биоэтанола имеет и определенные перспективы для экономики Ирака, основные из которых:

1) *диверсификация экономики*. Развитие производства биоэтанола может снизить зависимость от нефти и стимулировать рост сельского хозяйства и смежных отраслей;

2) *создание рабочих мест*. Проекты в сфере биоэнергетики потенциально могут улучшить ситуацию на рынке труда, особенно в сельских районах;

3) *сотрудничество с международными организациями*. Ирак уже участвовал в проектах по развитию возобновляемых источников энергии при поддержке ЕС. Привлечение иностранных инвестиций и технологий могло бы ускорить развитие отрасли.

Таким образом, производство биоэтанола в Ираке имеет потенциал, но его реализация требует комплексного подхода: развития инфраструктуры, решения технологических проблем, а также политической воли для переориентации части ресурсов с нефтегазового сектора на альтернативные источники энергии [3].

Перспективы мирового применения биоэтанола в топливной отрасли

По открытым данным аналитических исследований и отчетов специализированных агентств и консалтинговых фирм (BusinesStat, «ОМТ-Консалт»), отраслевых отчетов ОПЕК и IEA Bioenergy, а также исходя из данных глобальной базы Energy Information Administration получены агрегированные показатели потребления бензина по основным странам-потребителям моторного топлива (табл. 1).

Таблица 1

**Сводные данные по потреблению бензина
в основных странах-потребителях за 2023–2024 гг.**

Страна	Объем потребления бензина, млн т.	Особенности
1	2	3
Китай	177	Пик потребления пришелся на 2023 год (14,76 млн б/с). Ожидается дальнейшее снижение из-за роста популярности электромобилей: в 2025 году прогнозировался спад на 2,4 %
США	36	Внутренний спрос. Потребление связано с поездками по шоссе, сельским хозяйством и морским сектором
Россия	120	Данные в баррелях в сутки (б/с). В 2024 году производство бензина составило 41,1 млн т
Европа		
Германия	28,5	Один из крупнейших рынков ЕС; высокий автопарк, но растет доля электромобилей
Франция	22,0	Сильная политика декарбонизации; субсидирование электромобилей и гибридов
Италия	18,0	Значительная доля малолитражек и дизелей; постепенный переход на электротягу
Испания	16,5	Высокий туристический трафик; рост использования биотоплив (Е10)
Великобритания	15,0	Жесткие экологические нормы; запрет продаж ДВС с 2030 г.
Нидерланды	4,5	Высокая плотность зарядной инфраструктуры; один из лидеров по доле электромобилей

1	2	3
Польша	9,0	Преобладание подержанных авто; медленная электрификация транспорта
Латинская Америка		
Бразилия	38,0	Крупнейший рынок региона; широкое использование этанола (E27–E100) и гибких топлив
Мексика	24,0	Зависимость от импорта нефтепродуктов; рост автопарка
Аргентина	8,5	Экономические колебания влияют на спрос; субсидируемые цены на топливо
Чили	3,5	Активный переход на электромобили (особенно в городах); высокие налоги на бензин
Колумбия	5,0	Рост автопарка, но низкая средняя дистанция поездок
Перу	4,0	Урбанизация стимулирует спрос; зависимость от импорта бензина
Ближний Восток		
Объединенные Арабские Эмираты	~9,4	В 2023 году потребление составляло около 186,2 тыс. баррелей в сутки, что эквивалентно примерно 9,4 млн т в год
Саудовская Аравия	Нет точных данных	Крупнейший производитель нефти в регионе, но данные по потреблению бензина не указаны
Ирак	~8,5	В 2023 году потребление составляло около 167,5 тыс. баррелей в сутки, что эквивалентно примерно 8,5 млн т в год. В ноябре 2025 года Ирак объявил о полной самообеспеченности бензином и дизелем, прекратив их импорт
Сирия	0 (по данным на 2023 г.)	В 2023 году потребление бензина в Сирии зафиксировано на нулевом уровне. Это связано с длительным экономическим кризисом, разрушением инфраструктуры и санкциями, которые ограничивают импорт топлива. В предыдущие годы ситуация была более сложной: в 2010 году добыча нефти в стране достигала более 383 тыс. баррелей в сутки, но к 2014 году сократилась до 22,7 тыс. баррелей из-за войны
Египет	~8,4	В 2023 году потребление составляло около 166,34 тыс. баррелей в сутки, что эквивалентно примерно 8,4 млн т в год. Египет — крупнейший в Африке производитель электроэнергии, работающей на газе, но при этом сохраняет зависимость от ископаемого топлива. Страна стремится увеличить долю возобновляемой энергетики: к 2030 году планируется довести ее до 42 %

Исходя из имеющихся данных по мировому потреблению бензина, можно сделать вывод о наличии тенденций по трансформации топливной отрасли, что указывает на перспективу массового применения биоэтанола в качестве топлива. В частности, в Китае наблюдается снижение потребления бензина из-за активного перехода на электромобили и развития общественного транспорта. В США потребление бензина остается значительным, но может варьироваться в зависимости от экономических и социальных факторов. При этом в США активно применяется ряд топлив с добавками этанола: E10, E15 (с содержанием биэтанола 10 и 15 % соответственно) и специализированное топливо E85 с содержанием от 51 до 83 % этанола. В России производство и потребление бензина относительно стабильны, несмотря на то что в 2024 году наблюдалось небольшое снижение производства. В странах Европы имеются строгие экологические ограничения (стандарты Euro 7),

которые дают возможность активному применению топлива с добавками биоэтанола. Также наблюдается рост доли электромобилей и гибридов. В странах Латинской Америки (особенно в Бразилии) активно применяются добавки биоэтанола в топливо. Ирак, несмотря на недавние заявления о самообеспеченности, импортирует значительные объемы бензина и дизеля. В Египте, несмотря на развитие технологий возобновляемых источников энергии, продолжается активно использовать ископаемое топливо. Низкая стоимость бензина в Египте (одна из самых низких в Африке) поддерживается за счет государственных субсидий, что препятствует развитию применения биоэтанола в качестве топлива [4, 5].

Полученные данные говорят о том, что в условиях Республики Ирак и вообще в странах Ближнего Востока производство и применение биоэтанола в качестве топлива имеют определенные перспективы.

Перспективная региональная сырьевая база

Возможности сырьевой базы для производства биоэтанола находятся в сильной зависимости от климата региона. Ирак относится к субтропическому и тропическому климатическим поясам, но с заметными региональными различиями. Климат Ирака – континентальный, с ярко выраженной зональной дифференциацией: от субтропического на севере, до тропического на юге. Ключевые особенности определяются расположением в зоне пустынь и полупустынь, влиянием горных систем на северо-востоке и близостью Персидского залива на юго-востоке. Сводные данные по погодным условиям в основных климатических зонах страны представлены в табл. 2.

В климатических условиях Ирака высокую урожайность демонстрируют такие фруктовые культуры, как финики, виноград, цитрусовые, а также персики, миндаль и фисташки. Урожайность фруктовых культур в Ираке существенно варьируется в зависимости от вида растения, климатических условий, состояния инфраструктуры и исторических факторов. Основные проблемы сельского хозяйства страны включают засушливый климат, ограниченность орошаемых земель, последствия военных конфликтов и недостаточное развитие агротехнологий.

Финики – ключевая фруктовая культура Ирака. В прошлом страна была крупнейшим мировым производителем фиников, но во время ирано-иракской войны производство серьезно пострадало. К началу 2000-х годов уровень производства приблизился к довоенному, но к тому времени Ирак уступил лидерство Египту, Ирану и Саудовской Аравии. По данным на 2020 год, в Ираке выращивали около 6 миллионов деревьев сорта «захида» – самого распространенного в стране. Средняя годовая урожайность составляла 73 кг с дерева, но часто превышала 100 кг. Финиковые пальмы начинают плодоносить на 4–5 год жизни, а максимальной урожайности достигают к 15 – 20 годам. Плодоносить дерево может 60 – 80 лет. Финиковые пальмы требовательны к воде: несмотря на то что они устойчивы к засухе, для нормального роста и плодоношения нуждаются в регулярном орошении. Основные плантации сосредоточены в южных регионах, вдоль рек Тигр и Евфрат, а также в районе Шатт-эль-Араба.

В Ираке культивируют в основном столовые сорта винограда (Мускат александрийский, Тайфи белый и розовый, Мускат белый, Кишмиш белый и Кишмиш суугли), а также винные сорта (длинный палестинский, Кариньян, Арамон). Площадь виноградников в стране оценивалась примерно в 55 тыс. га. К сожалению, урожайность винограда в Ираке относительно невысока, вследствие низкого уровня агротехники с преобладанием поливной системы возделывания.

Таблица 2

Погодные условия в основных климатических зонах республики Ирак

Климатическая зона	Зима	Лето	Осадки и особенности климата
Север (горные районы Курдистана, окрестности Мосула)	Прохладная и дождливая, возможны заморозки и снег (особенно в горах). Средняя январская температура: +7...+12 °С	Жаркое и сухое, но менее экстремальное, чем на равнинах. Средняя июльская температура: +30...+34 °С	До 1500 мм/год в горах (максимум – ноябрь-апрель), на предгорьях – 300...560 мм/год
Центральные равнины (Багдад, Тикрит)	Мягкая, с редкими заморозками. Средняя январская температура: +10...+15 °С	Крайне жаркое и засушливое. Средняя июльская температура: +34...+38 °С, максимумы – до +50...+52 °С	100...180 мм/год, почти все – с ноября по апрель. С июня по сентябрь дожди отсутствуют. Частые пыльные бури летом; высокая инсоляция (свыше 3200 ч солнца/год)
Юг (Наджафия, Басра, прилегающие к Персидскому заливу районы)	Теплая, без заморозков. Средняя январская температура: +12...+16 °С	Экстремально жаркое и влажное у побережья. Средняя июльская температура: +36...+40 °С, максимумы – до +48...+50 °С	50...100 мм/год, преимущественно зимой, высокая влажность у залива; летом – пыльные бури и ветер шарки (юго-восточный)
Западные пустыни (Сирийская пустыня, район Рутба)	Прохладная, возможны ночные заморозки. Средняя январская температура: +8...+12 °С	Очень жаркое. Средняя июльская температура: +32...+36 °С, максимумы – до +45...+47 °С	Менее 100 мм/год, сконцентрированы в зимние месяцы. Резкие суточные колебания температур; песчаные бури

В Ираке выращивают апельсины и мандарины, но объемы производства значительно уступают другим странам региона. Например, в 2015 году производство апельсинов в Ираке составляло около 137,5 тыс. т, а мандаринов – значительно меньше. На урожайность citrusовых влияют климатические условия, доступность воды для орошения и состояние инфраструктуры. В прошлом экспорт мандаринов из Ирака сокращался из-за логистических проблем и разногласий с поставщиками [5].

В южных регионах Ирака также выращивают персики, миндаль и фисташки. Однако объемы производства этих культур незначительны по сравнению с финиками и citrusовыми.

По данным на 2023 год, объем производства фиников в Ираке составлял 635,9 тыс. т в год. В том же году убранная площадь под финиковыми пальмами в стране достигала 276 тысяч гектаров, а урожайность с гектара – 2,3 т. Ранее, в 2000-х годах, производство фиников в Ираке было значительно выше. Например, в 2008 году сообщалось, что в стране собирали около 400 тысяч т фиников в год, что составляло примерно 15 % мирового производства. На тот момент Ирак занимал второе место в мире по объему сбора фиников после Египта.

Приведем данные по общим объемам производства фруктов (фиников, винограда и апельсинов) в Ираке за период 2015 – 2020 гг. по плантационным или садо-

вым культурам, выращиваемым на продажу (по данным отчета FAO – продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН за 2021 год), тыс. т: 2015 – 1 109,4; 2016 – 1 197, 9; 2017 – 1 254,5; 2018 – 1 430, 0; 2019 – 1 922, 7; 2020 – 1 980,4.

Рекордный уровень производства фруктов в Ираке достигнут в 2001 году – 2 613 107 т. Самый низкий показатель за время наблюдения с 1961 года составил 776 839 т. В том же отчете на 2021 год указаны данные по некоторым культурам, тыс. т: финики – 668; виноград – 433,1; апельсины – 137,5.

Методика расчета выхода биоэтанола из фруктового сырья

Методика расчета выхода биоэтанола из фруктового сырья основана на химическом уравнении спиртового брожения и учитывает молекулярные массы веществ, участвующих в реакции [6 – 9]. Спиртовое брожение – это биологический процесс, при котором дрожжи преобразуют сахара (глюкозу, фруктозу, сахарозу и др.) в этанол (этиловый спирт) и углекислый газ в анаэробных условиях.

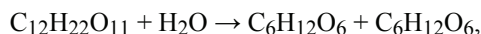
Химическое уравнение брожения для глюкозы



То есть одна молекула глюкозы ($C_6H_{12}O_6$) превращается в две молекулы этанола (C_2H_5OH) и две молекулы углекислого газа (CO_2).

Химическое уравнение брожения для сахарозы ($C_{12}H_{22}O_{11}$).

В этом случае процесс немного сложнее: сначала сахароза расщепляется на глюкозу и фруктозу, а затем каждая из них ферментируется



а затем каждая из них ферментируется (см. химическое уравнение брожения для глюкозы).

Расчет теоретического выхода этанола из определенного количества сахара.

1. Определяем молекулярные массы веществ:

– глюкоза ($C_6H_{12}O_6$): $6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180$ г/моль;

– этанол (C_2H_5OH): $2 \times 12 + 5 \times 1 + 16 + 1 = 46$ г/моль.

2. Исходя из уравнения реакции, из 1 моль глюкозы получается 2 моль этанола. Пересчитаем в граммы:

– 180 г глюкозы дают $2 \times 46 = 92$ г этанола.

3. Рассчитаем выход этанола на 1 кг сахара:

– для глюкозы: $18092 \approx 0,511$ кг этанола на 1 кг глюкозы;

– учитывая плотность этанола (примерно 0,789 кг/л), переведем в литры: $0,7890,511 \approx 0,647$ л этанола на 1 кг глюкозы.

Для сахарозы расчет корректируется с учетом того, что сахароза состоит из двух моносахаридов. Молекулярная масса сахарозы – 342 г/моль. После расщепления на глюкозу и фруктозу (каждая по 180 г/моль) общая масса сбраживаемых сахаров равна 360 г. Из 342 г сахарозы получается 184 г этанола (по 92 г от каждого моносахарида). Выход в литрах составит $342184/0,789 \approx 0,681$ л этанола на 1 кг сахарозы.

Необходимо отметить, что данный расчет является приближенным. Для расчета выхода биоэтанола в реальном процессе брожения необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на реальный выход [7]:

- 1) качество сырья и дрожжей: не все сахара могут быть доступны для ферментации, а дрожжи могут быть недостаточно активны;
- 2) температурный режим: оптимальная температура для большинства дрожжей – 20...30 °С; отклонения замедляют или останавливают брожение;
- 3) кислотность среды: оптимальный диапазон для спиртовых дрожжей – 4,5–5; в щелочной среде может происходить образование глицерина и других побочных продуктов;
- 4) наличие примесей и ингибиторов: некоторые вещества в сырье (например, фурфурол, фенолы) могут подавлять активность дрожжей;
- 5) технологические потери: часть этанола может испаряться, возможны потери при обработке и хранении;
- 6) неполное сбраживание: если брожение не доведено до конца, часть сахара останется несброженным.

Для приблизительного расчета реального выхода в инженерной методике можно использовать коэффициент эффективности, который учитывает потери [8]. Таким образом, методика расчета включает химический анализ реакции, учет молекулярных масс и корректировку на практические условия процесса.

Расчет выхода биоэтанола из перспективного сырья

Приведем результаты расчет выхода биоэтанола из перспективного для Ирака наиболее распространенного сырья – фиников, которое подходит для производства биоэтанола благодаря высокому содержанию простых углеводов (сахаров). В сушеных плодах концентрация сахаров достигает 60 – 65 % от общего веса – это один из самых высоких показателей среди фруктов. Усредненный состав сушеных фиников, полученный согласно исследованиям [4], представлен в табл. 3.

С учетом того что из 1 моля глюкозы (180 г) получается 2 моля этанола (2×46 = 92 г), теоретический выход биоэтанола на 1 кг сырья составит:

$$92/180 \approx 0,511 \text{ (51,1 \% от массы сахаров)}.$$

Для 670,3 г углеводов (предполагаем, что все углеводы – сбраживаемые сахара) выход этанола составит 670,3×0,511 ≈ 342,5 г.

На практике выход этанола ниже из-за неполного извлечения сахаров при подготовке суслу (потери ~10 – 20 %), неполного сбраживания (потери ~5 – 15 %), потери при дистилляции и очистке ~5 – 10 %. В результате итоговый коэффициент эффективности обычно составляет 60 – 75 % от теоретического выхода.

Таблица 3

Усредненный состав сушеных фиников на 100 г продукта

Показатель	Содержание, г
Углеводы	67,03
Вода	20,53
Белки	2,45
Жиры	0,39
Пищевые волокна	8,0
Зола	1,6

Примем средний коэффициент эффективности 70 %. Соответственно получим $342,5 \times 0,70 \approx 239,8$ г этанола из 1 кг фиников. Принимая плотность этанола при $20\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 0,789$ г/мл, получим объемный выход биоэтанола из 1 кг фиников $239,8/0,789 \approx 303$ мл.

Таким образом, для производства 1 л биоэтанола потребуется примерно 3,33 кг фиников.

По данным серии экспериментов, проведенных в Саудовской Аравии, из 1 т фиников было получено в среднем 300 л биоэтанола, что показывает хорошую сходимость с расчетными данными [4]. При этом необходимо отметить, что в ходе экспериментов использовались наименее востребованные сорта фиников.

В таблице 4 показано рассчитанное по представленной методике количество фруктового сырья, имеющего определенные перспективы для производства биоэтанола в Республике Ирак. Все значения рассчитаны для идеальных условий (максимальная экстракция сахаров, эффективная ферментация, минимальные потери).

Таблица 4

Сводная таблица выхода биоэтанола для фруктового сырья, перспективного для Республики Ирак

Сырье	Средний вес плода, г на 1 ед. сырья	Содержание сахаров, %, (среднее)	Среднее количество сахаров в 1 кг сырья, г	Требуется сырья на 1 л этанола, кг	Пояснение / примечание
Арбуз	5000	6 – 10 (8)	80	17,5 – 25	Зависит от сорта и спелости; расчет для мякоти без корки
Апельсин	200	8 – 12 (10)	100	14 – 16	Из цельного плода; при переработке жмыха – на 20 – 30 % меньше
Банан (без кожуры)	125	12 – 16 (14)	140	12 – 14	Спелые плоды; кожура не учитывается
Виноград (столовый)	6	15 – 18 (16,5)	165	10 – 12	Расчет для цельных ягод; жмых дает меньший выход
Груша	180	9 – 11 (10)	100	14 – 16	Зависит от сорта и степени зрелости
Клубника	12,5	4,5 – 6 (5,25)	52,5	28 – 32	Низкое содержание сахаров; высокая вариабельность
Киви	75	8 – 10 (9)	90	16 – 18	Зависит от сорта и спелости
Яблоко	150	10 – 12 (11)	110	13 – 15	Сладкие сорта – выше выход; кислые – ниже
Финики (сушеные)	10 – 15	60 – 65 (62,5)	625	2,5 – 3,3	Высокое содержание сахаров; расчет для сушеных плодов
Манго	300	12 – 15 (13,5)	135	11 – 13	Спелые плоды; вариабельность по сортам
Ананас	1200	11 – 14 (12,5)	125	12,5 – 14	Расчет для мякоти без кожуры и сердцевины
Персик	150	8 – 11 (9,5)	95	15 – 17	Зависит от сорта и степени зрелости

Заключение

Как следует из результатов расчета выхода биоэтанола из фруктового сырья, наиболее эффективными культурами являются финики, бананы и виноград (высокое содержание сахаров, высокий выход целевого продукта). Менее перспективны – клубника и апельсины (низкий выход сахаров на единицу массы, технологические проблемы переработки). Следует отметить, что сезонность и логистика могут сделать некоторые фрукты нерентабельными для производства биоэтанола. Финики – традиционная культура Ирака. До ирано-иракской войны страна была одним из крупнейших мировых производителей фиников, но за годы конфликтов производство значительно сократилось. Возрождение финиковых плантаций могло бы не только поддержать сельское хозяйство, но и обеспечить сырье для активного развития производства биоэтанола, что в свою очередь позволило бы снизить зависимость экономики страны от нефти, стимулировать рост сельского хозяйства и смежных отраслей, улучшить ситуацию на рынке труда, а также развивать сотрудничество Ирака с международными организациями, что положительно сказалось бы на имидже страны на мировой арене.

Список литературы

1. Obodovych, O. Realities and prospects of future complex processing of plant raw materials into bioethanol and by-products / O. Obodovych, V. Sydorenko // *Biotechnologia Acta*. – 2020. – Vol. 13, No. 6. – P. 13–23. doi: 10.15407/biotech13.06.013
2. Доржеев, А. А. Требования стандартов к топливному этанолу и биоэтанолу / А. А. Доржеев // *Эпоха науки*. – 2022. – № 29. – С. 36–39.
3. Джамалов, З. З. Современное состояние и пути совершенствования производства биоэтанола из виноградного жмыха / З. З. Джамалов, Р. А. Кемалов // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. – 2023. – № 2(407). – С. 34–42. doi: 10.15518/isjaee.2023.02.034-042
4. Карпов, С. А. Технология производства биоэтанола – экологически чистого компонента автомобильного топлива / С. А. Карпов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2007. – № 8. – С. 18–23.
5. Леденев, В. П. Мировые тенденции развития биоэтанола / В. П. Леденев // *Ликероводочное производство и виноделие*. – 2007. – № 10. – С. 22–23.
6. Биотопливо, его получение и использование (обзор) / А. Н. Лисицын, В. В. Ключкин, В. Н. Григорьева, Т. Б. Алымова // *Масложировая промышленность*. – 2007. – № 2. – С. 40–42.
7. Миронова, Г. Ф. Повышение эффективности процесса получения биоэтанола из шелухи овса / Г. Ф. Миронова, Е. А. Скиба // *Химия и химическая технология переработки растительного сырья: материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10 – 12 октября 2018 г.* – Минск, 2018. – С. 87–91.
8. Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach / A. Devi, S. Bajar, H. Kour, R. Kothari, D. Pant, A. Singh // *Bioenergy Research*. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – P. 1820–1841. doi: 10.1007/s12155-022-10401-9
9. An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks / M. Toor, S. S. Kumar, S. K. Malyan [et al.] // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 242, No. 3. – P. 125080. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125080

Prospects for Bioethanol Production in the Republic of Iraq

© Mohammed Sukina Jalal Mohammed¹, A. N. Pakhomov²✉,
N. Ts. Gatapova², Yu. V. Pakhomova²

¹ Baghdad University of Technology, Iraq;

² Department of Technological Processes, Equipment, and Technosphere Safety,
panpost@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russian Federation

Keywords: bioethanol yield; glucose; calculation method; productivity; regional feedstock; fuel market; fructose.

Abstract: The possibility of producing bioethanol as a fuel additive in the Republic of Iraq is substantiated. Summary statistical data for the main motor fuel consuming countries is provided. Gasoline consumption volumes are examined, and key factors influencing fuel market dynamics are identified. An overview of the promising regional raw material base of the Republic of Iraq is presented. Using an engineering methodology for determining ethanol yield from sugar feedstock, calculations are performed for feedstocks promising for cultivation and processing in Iraqi conditions. Quantitative indicators of bioethanol yield are presented, and the technological feasibility of its production from local feedstock is assessed.

References

1. Obodovych O., Sydorenko V. Realities and prospects of future complex processing of plant raw materials into bioethanol and by-products, *Biotechnologia Acta*, 2020, vol. 13, no. 6, pp. 13-23, doi: 10.15407/biotech13.06.013
2. Dorzheyev A.A. [Requirements of standards for fuel ethanol and bioethanol], *Epokha nauki* [The Age of Science], 2022, no. 29, pp. 36-39. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Dzhamaalov Z.Z., Kemalov R.A. [Current state and ways to improve the production of bioethanol from grape pomace], *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology] (ISJAEE), 2023, no. 2(407), pp. 34-42. doi: 10.15518/isjaee.2023.02.034-042 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Karpov S.A. [Technology of production of bioethanol - an environmentally friendly component of automobile fuel], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas complex], 2007, no. 8, pp. 18-23. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Ledenev V.P. [Global Trends in Bioethanol Development], *Likervodochnoye proizvodstvo i vinodeliye* [Liquor and Vodka Production and Winemaking], 2007, no. 10, pp. 22-23. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Lisitsyn A.N., Klyuchkin V.V., Grigor'yeva V.N., Alymova T.B. [Biofuel, Its Production and Use (Review)], *Maslozhirovaya promyshlennost'* [Oil and Fat Industry], 2007, no. 2, pp. 40-42. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Mironova, G.F., Skiba Ye.A. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya: materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Chemistry and chemical technology of processing plant raw materials: materials of reports of the International scientific and technical conference], Minsk, October 10-12, 2018, Minsk, 2018, pp. 87-91. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Devi A., Bajar S., Kour H., Kothari R., Pant D., Singh A. Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach, *Bioenergy Research*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 1820-1841. doi: 10.1007/s12155-022-10401-9

9. Toor M., Kumar S.S., Malyan S.K. [et al.] An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks, *Chemosphere*, 2020, vol. 242, no. 3, pp. 125080. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125080

Perspektiven für die Bioethanolproduktion in der Republik Irak

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit, Bioethanol als Kraftstoffzusatz in den Bedingungen der Republik Irak herzustellen, begründet. Es sind zusammenfassende Statistiken für die wichtigsten Verbraucherländer von Kraftstoffen präsentiert. Die Benzinverbrauchsmengen sind untersucht und die Schlüsselfaktoren für die Dynamik des Kraftstoffmarktes identifiziert. Es ist ein Überblick über die vielversprechenden regionalen Rohstoffvorkommen der Republik Irak gegeben. Auf der Grundlage einer ingenieurtechnischen Methode zur Bestimmung der Ethanol-Ausbeute aus zuckerhaltigen Rohstoffen sind Berechnungen für Rohstoffarten durchgeführt, die vielversprechend für den Anbau und die Verarbeitung unter den Bedingungen im Irak sind. Quantitative Indikatoren der Bioethanol-Ausbeute sind vorgestellt und die technologische Zweckmäßigkeit der Produktion aus lokalen Rohstoffen bewertet.

Perspectives de la production de bioéthanol en république d'irak

Résumé: Est justifiée la possibilité de produire du bioéthanol en tant qu'additif au carburant dans les conditions de la République d'Irak. Sont citées des données statistiques récapitulatives pour les principaux pays consommateurs du carburant. Sont examinés les volumes de la consommation d'essence et sont identifiés les principaux facteurs influant sur la dynamique du marché des carburants. Est présenté un aperçu de la base régionale prometteuse de produits de base de la République d'Irak. A la base de la méthode d'ingénierie de détermination du rendement de l'éthanol à partir de matières premières de sucre sont effectués des calculs pour les matières premières prometteuses pour la culture et le traitement dans des conditions d'Irak. Sont donnés les indicateurs quantitatifs du rendement en bioéthanol, est évaluée l'opportunité techno-logique de sa production à partir de matières premières locales.

Авторы: *Мохаммед Сукина Джалал Мохаммед* – доцент, Технологический университет, Багдад, Республика Ирак; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пахомова Юлия Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В КАСКАДНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ALTAIR EDEM

© Хамза Фарур¹✉, В. Я. Борщев¹, Г. А. Титов¹

¹ Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
hamza.faarour@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: каскадный гравитационный смеситель; качество смеси; компьютерное моделирование; коэффициент заполнения; коэффициент неоднородности; процесс смешивания; система Altair EDEM; сыпучий материал.

Аннотация: С помощью метода дискретных элементов (DEM) от Altair EDEM software исследовано влияние коэффициента заполнения смесителя на качество смешивания сыпучих материалов в каскадном гравитационном смесителе. Проведена серия компьютерных симуляций с различным коэффициентом заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом, при этом конструкция смесителя, свойства материала и распределение частиц по размерам оставались неизменными. Качество смешивания с течением времени оценивали с помощью коэффициента неоднородности. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции и функциональности гравитационных смесителей в отраслях промышленности, где используются зернистые сыпучие материалы.

Введение

В различных отраслях промышленности, в том числе пищевой, фармацевтической, химической, строительной и других, процесс приготовления однородных смесей из сыпучих материалов имеет решающее значение [1 – 7]. Для получения необходимых свойств готовой продукции твердые частицы различных размеров, форм и плотностей смешивают в барабанных, гравитационных, ленточных, шнековых, плужных и других смесителях [8 – 16].

Для смешивания хорошо сыпучих материалов широко применяются каскадные гравитационные смесители, которые обычно используются для тщательного смешивания зернистых сыпучих материалов, что позволяет обеспечить достаточно высокое качество конечного продукта [7, 10, 11]. Однако существующие конструкции каскадных смесителей зачастую характеризуются неравномерностью перемешивания, что может привести к различиям в составе смеси при работе с материалами, имеющими разные физические свойства. Другая проблема этих смесителей заключается в том, что их достаточно сложно обслуживать, что может замедлить производственный процесс [10]. В настоящей работе исследуется разработанная авторами конструкция каскадного гравитационного смесителя для гранулированных сыпучих материалов [17]. Разработанный смеситель позволяет

получать высококачественные смеси сыпучих материалов за счет организации перекрестных потоков, многократного их перераспределения и обеспечения равномерного распределения смешиваемых компонентов как в поперечном, так и в продольном сечениях смесителя.

Основными техническими характеристиками смесителей сыпучих материалов являются их производительность и качество приготовленной смеси [1]. В свою очередь, эффективность работы смесителя определяется его конструктивными параметрами и коэффициентом заполнения сыпучим материалом.

Эффективная работа смесителей сыпучих материалов в значительной степени зависит от коэффициента его заполнения материалом. Для смесителей имеет место минимальный и максимальный коэффициент заполнения, в пределах которого его работа характеризуется максимальной эффективностью и при этом достигается оптимальное качество получаемой смеси. При небольшом и слишком большом коэффициентах заполнения частицы сыпучих материалов перемешиваются, как правило, неэффективно. При этом смесители характеризуются большим временем смешивания и низкой производительностью.

Для гравитационных смесителей непрерывного действия коэффициент заполнения находится в пределах 0,15...0,35. При оптимальной величине коэффициента заполнения частицы движутся по траектории, которая оставляет свободное пространство для их эффективного перемещения в процессе смешивания.

Цель работы – исследование влияния коэффициента заполнения сыпучего материала на эффективность процесса смешивания в каскадном гравитационном смесителе.

Анализ процесса смешивания частиц сыпучего материала в многоступенчатом гравитационном смесителе и моделирование процесса в данном исследовании проведены с использованием программного обеспечения Altair EDEM [18 – 21]. Компьютерное моделирование широко применяется для проектирования различных типов смесителей [22, 23]. Эти инструменты моделирования могут предоставить как пространственную, так и временную информацию для всех частиц в расчетной области.

Компьютерное моделирование процесса смешивания в многоступенчатом гравитационном смесителе

Проведено исследование влияния коэффициента заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом на эффективность смешивания в гравитационном каскадном смесителе с шестью ступенями смешивания при одинаковой массовой доле содержания крупных и мелких частиц в исходном материале. Для моделирования влияния коэффициента заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом на коэффициент неоднородности смеси в настоящей работе проведена цифровая выборка с использованием программного обеспечения EDEM в каскадном гравитационном смесителе. При моделировании использовался 21-секундный интервал работы смесителя, обеспечивающий выход процесса смешивания на устойчивый режим. В настоящем исследовании метод дискретных элементов использован с программным обеспечением Altair EDEM для создания модели смешивания частиц сыпучего материала в каскадном гравитационном смесителе непрерывного действия. С помощью моделирования проведено исследование влияния коэффициента заполнения смесителя сыпучим материалом на распределение частиц в корпусе и их смешивания, то есть на качество смеси.

С помощью SolidWorks создана 3D-модель многоступенчатого гравитационного смесителя, которая затем была импортирована в EDEM для моделирования (рис. 1). Конструкция смесителя, выполненная в SolidWorks, состоит из вертикального

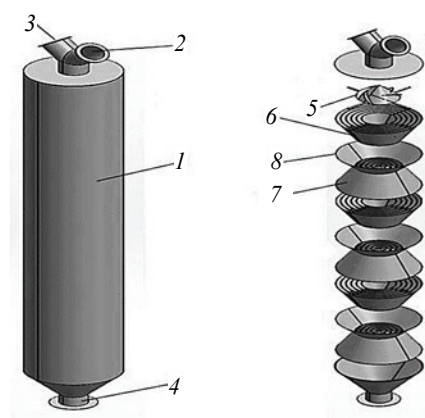


Рис. 1. Каскадный гравитационный смеситель сыпучих материалов

цилиндра 1, двух верхних загрузочных штуцеров 2, 3 и нижнего выпускного штуцера 4. Равномерное распределение исходных компонентов по поперечному сечению смесителя в верхней части корпуса обеспечивается с помощью распределителя потока 5.

Смесительные секции в виде верхних 6 и нижних 7 пересыпных воронок расположены в корпусе смесителя каскадом, образуя многоступенчатую систему перемешивания (рис. 2). Направляющие воронки 8, расположенные над нижними пересыпными воронками, служат для подачи частиц исходных компонентов в зоны наиболее эффективного перемешивания. Длинные 9 и короткие 10 перевернутые усеченные конусы, расположенные с чередованием, образуют верхние пересыпные воронки. Перекрещивающиеся траектории движения частиц создаются за счет расположения в зазорах между конусами изогнутых лопаток 11 с противоположным наклоном в смежных зазорах между этими конусами. Нижние воронки также состоят из установленных с чередованием длинных 12 и коротких 13 усеченных конусов, но ориентированных широкими основаниями вниз. Между ними установлены дополнительные изогнутые лопасти 14, которые создают вихревые движения, способствующие более равномерному перемешиванию частиц в зоне между пересыпными воронками. Такое расположение пересыпных элементов способствует более эффективному перераспределению частиц материала в корпусе смесителя и, соответственно, более эффективному их смешиванию.

Во всех проведенных сериях вычислительных экспериментов скорость подачи частиц исходных компонентов поддерживалась постоянной и составляла

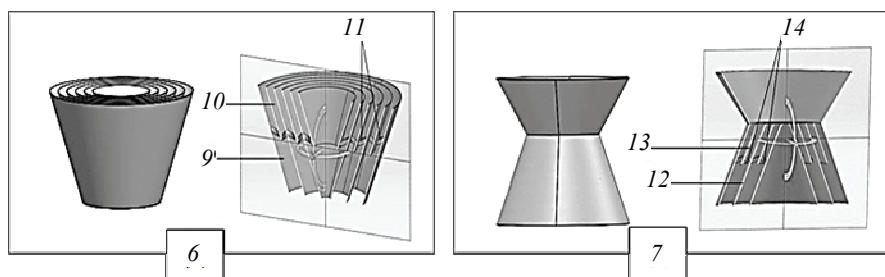


Рис. 2. Внутреннее устройство пересыпных воронок 6 и 7 в каскадном гравитационном смесителе

30 000 частиц/с. Физические и механические параметры исходных компонентов, использованных при моделировании в расчетах в программной среде Altair EDEM:

Плотность.....	950 кг/м ³
Модуль Юнга.....	$8,76 \times 10^7$ Па
Модуль сдвига.....	$3,0 \times 10^7$ Па
Коэффициент Пуассона.....	0,46
Коэффициент восстановления.....	0,55
Коэффициент трения покоя.....	0,40
Коэффициент трения качения.....	0,25

Для учета гравитационного воздействия начальную поступательную скорость частиц задавали равной – 15 м/с, а угловую скорость равной – 15 рад/с. При этом обе величины направлены по отрицательному направлению оси *Y*. Ускорение свободного падения в расчетах принимали равным – 10 м/с² и также направленным по оси *Y*. Расчет выполняли при *t* = 0 с, при этом в смесителе сыпучий материал отсутствовал.

Настройки и параметры моделирования для Altair EDEM:

Решатель.....	Герц-Миндлин (без скольжения) со стандартным сопротивлением качению
Время интегрирования.....	Эйлеров метод
Шаг по времени Рэлея.....	$2,7866 \times 10^{-5}$ с
Процент Рэлея.....	40 %
Текущий шаг по времени.....	$1,11464 \times 10^{-5}$ с
Время моделирования.....	21 с
Интервал сохранения данных.....	0,1 с
Размер ячейки расчетной сетки.....	3,75 мм
Оценочное количество ячеек сетки.....	2247264
Используемое количество ядер процессора.....	12
Время моделирования одного эксперимента.....	≈ 2–3 суток

Эти параметры определяют методику расчета, временные интервалы, количество частиц и другие важные элементы, которые влияют на вычислительную эффективность и корректность моделирования. Все настройки были тщательно подобраны, чтобы обеспечить наилучший баланс между производительностью и точностью расчета.

Моделирование процесса смешивания в программной среде Altair EDEM проведено при следующих допущениях.

Модель контакта Герца–Миндлина, которая предполагает отсутствие скольжения между частицами, использовали наряду с обычным трением при качении, чтобы показать, как частицы контактируют и движутся относительно друг друга. Адгезионные и электрические свойства при моделировании не учитывали, поскольку полиэтилен обладает низкой поверхностной энергией и используется в сухих условиях. Вязкое демпфирование и другие диссипативные эффекты, приписанные формуле Герца–Миндлина, явно не моделировались, а непрерывную жидкую фазу (например, воздух) не учитывали, так как в сухих гранулированных потоках преобладают механические контакты.

Частицы были смоделированы в виде идеальных сфер с использованием встроенных геометрических инструментов EDEM без сложного импорта сетки (например, STL-файлов). Эта методологическая основа позволила детально наблюдать за динамическим процессом перемешивания и оценить влияние количества частиц в корпусе смесителя на пространственное распределение частиц и однородность смеси.

Смешивание является одним из важнейших технологических процессов, поскольку от однородности смеси из исходных компонентов в дальнейшем зависит качество готовых изделий и конструкций. Существует несколько факторов, влияющих на качество смеси в процессе смешивания, таких как состояние и концентрация компонентов смеси, конструкция смесителя (форма рабочего органа, форма смесительной камеры и варианты загрузки смешиваемых компонентов), а также технологический режим процесса смешивания. В любом объеме идеальной однородной смеси с феноменологической точки зрения должны присутствовать частицы всех компонентов в количествах, определяемых их заданным соотношением. Однако в действительности такого идеального расположения частиц в объеме смеси не наблюдается. В случайно выбранных объемах смеси может быть большое количество комбинаций частиц компонентов, то есть их случайное распределение в смеси, что приводит к использованию статистического подхода [24] для оценки качества смеси. Наиболее распространенным и часто используемым критерием оценки качества смеси является коэффициент неоднородности [1]

$$V_c = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где $\bar{C}$ – среднеарифметическая концентрация исследуемого ключевого компонента, рассчитанная по совокупности проб; C_i – значение концентрации ключевого компонента в i -й пробе; n – количество проб, включенных в анализ.

Для исследования параметров неоднородности смеси в работе использовано программное обеспечение EDEM, которое позволяет выбирать широкий спектр физических свойств смешиваемых материалов, таких как моделирование любого типа и формы материала: крупных кусков или мелких порошков, сухих или влажных материалов. Все это позволяет моделировать процессы и делать выводы о том, как различные сыпучие и влажные материалы будут взаимодействовать друг с другом, а также с элементами проектируемого оборудования при различных технологических условиях [25]. Метод дискретных элементов (МДЭ) – это численный метод, используемый для моделирования движения частиц, взаимодействующих друг с другом посредством столкновения. Фактически, EDEM моделирует динамику каждой частицы индивидуально и численно интегрирует их ускорения, которые зависят от суммы всех сил, включая контактные и гравитационные. Положение каждой частицы фиксируется, а их взаимодействия оцениваются на каждом временном шаге. Затем рассчитываются все силы, действующие на каждую частицу, и используется второй закон Ньютона для определения ускорений, чтобы найти скорость и положение частицы в каждый момент времени. Этот процесс повторяется до конца симуляции [18, 19]. Таким образом, МЭД является надежным и высокопроизводительным инструментом для моделирования различных процессов с сыпучими и влажными материалами; в частности, этот метод широко используется для моделирования процессов, происходящих в различных типах смесителей [26], для получения качественных строительных материалов, изделий и конструкций.

Результаты и обсуждения

Полное численное исследование коэффициента неоднородности проведено с помощью программного обеспечения Altair EDEM и модуля Analyst для каскадного гравитационного смесителя сыпучих материалов. Исследование охватывало весь процесс смешивания: от начального момента ($t = 0$ с) и до конца моделирования ($t = 21$ с), что позволило детально проследить за временной эволюцией однородности смеси.

Для количественной оценки пространственного распределения компонентов смеси объем камеры смешивания делили на контрольные ячейки отбора проб с применением сеточного пространственного разбиения, реализованных в модуле Analyst программного комплекса EDEM. Данный метод позволил эффективно отслеживать динамику распределения компонентов в камере смешивания с высокой временной разрешающей способностью на протяжении всего моделирования.

На рисунке 3 показано пространственно-массовое распределение исходных компонентов А и В в трехмерном пространстве в корпусе каскадного гравитационного смесителя к концу процесса смешивания ($t = 21$ с). Каждая проекция на рисунке показывает расположение частиц в соответствии с осью, что обеспечивает более точную оценку пространственного распределения сыпучего материала после завершения моделирования. Кроме того, на каждом изображении представлена цветовая шкала, отражающая градиент концентрации частиц в корпусе смесителя, что позволяет визуально оценивать равномерность распределения частиц сыпучего материала. Данные получены с помощью модуля Analyst в Altair EDEM и использованием метода GridBin. При этом расчетная область была разделена на обычную сетку из кубических ячеек размером $5 \times 30 \times 5$ вдоль осей X , Y и Z . Затем в каждой кубической ячейке определяли общую массу частиц А и В. Цвета показывают, как распределена общая масса частиц А и В (в кг) в каждой ячейке, и дают понять, насколько однородна смесь.

Таким образом, представленные на рис. 3 результаты наглядно демонстрируют установившееся конечное распределение частиц компонентов А и В в корпусе смесителя с использованием различных пространственных проекций, что позволяет детально анализировать положение каждого типа частиц в смеси после завершения моделирования. Такое представление данных, основанное на массе частиц смешиваемых компонентов, позволяет связать полученную качественную картину с количественными параметрами смеси, характеризующими процесс смешивания. Данные о распределении массы в каждой ячейке необходимы для расчета коэффициента неоднородности, позволяющего объективно оценить качество получаемой смеси, то есть насколько хорошо произошло распределение частиц исходных компонентов в объеме смесителя.

Далее полученные в программе EDEM временные массивы данных экспортированы и обработаны с использованием программного пакета Microsoft Excel. На основе этих данных рассчитан цифровой коэффициент неоднородности в соответствии с уравнением (1) для последовательных временных интервалов от начала до конца процесса смешивания. Этот метод позволил количественно охарактеризовать развитие однородности смеси и оценить эффективность процесса смешивания на различных стадиях его протекания в корпусе смесителя.

На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента неоднородности V_c , %, от времени для процесса смешивания при различных значениях коэффициента заполнения, которые соответствуют разным уровням загрузки смесителя. На начальной стадии процесса смешивания (0...3 с) все кривые характеризуются высокими значениями коэффициента неоднородности, что указывает на неравномерное распределение частиц в рабочем объеме. В этот период частицы находятся на стадии начальной загрузки, и эффективные механизмы взаимодействия и диффузионного перераспределения еще не сформированы.

По мере увеличения времени коэффициент неоднородности резко снижается, что свидетельствует о формировании основных механизмов смешивания, таких как многократные столкновения, относительное скольжение и пространственная переориентация частиц. При этом режимы с большим коэффициентом заполнения (кривые 4 – 6) демонстрируют более высокую скорость снижения коэффициента неоднородности и более низкие его предельные значения по сравнению с режимами с меньшим коэффициентом заполнения, что указывает на повышение эффективности смешивания при увеличении численной плотности частиц.

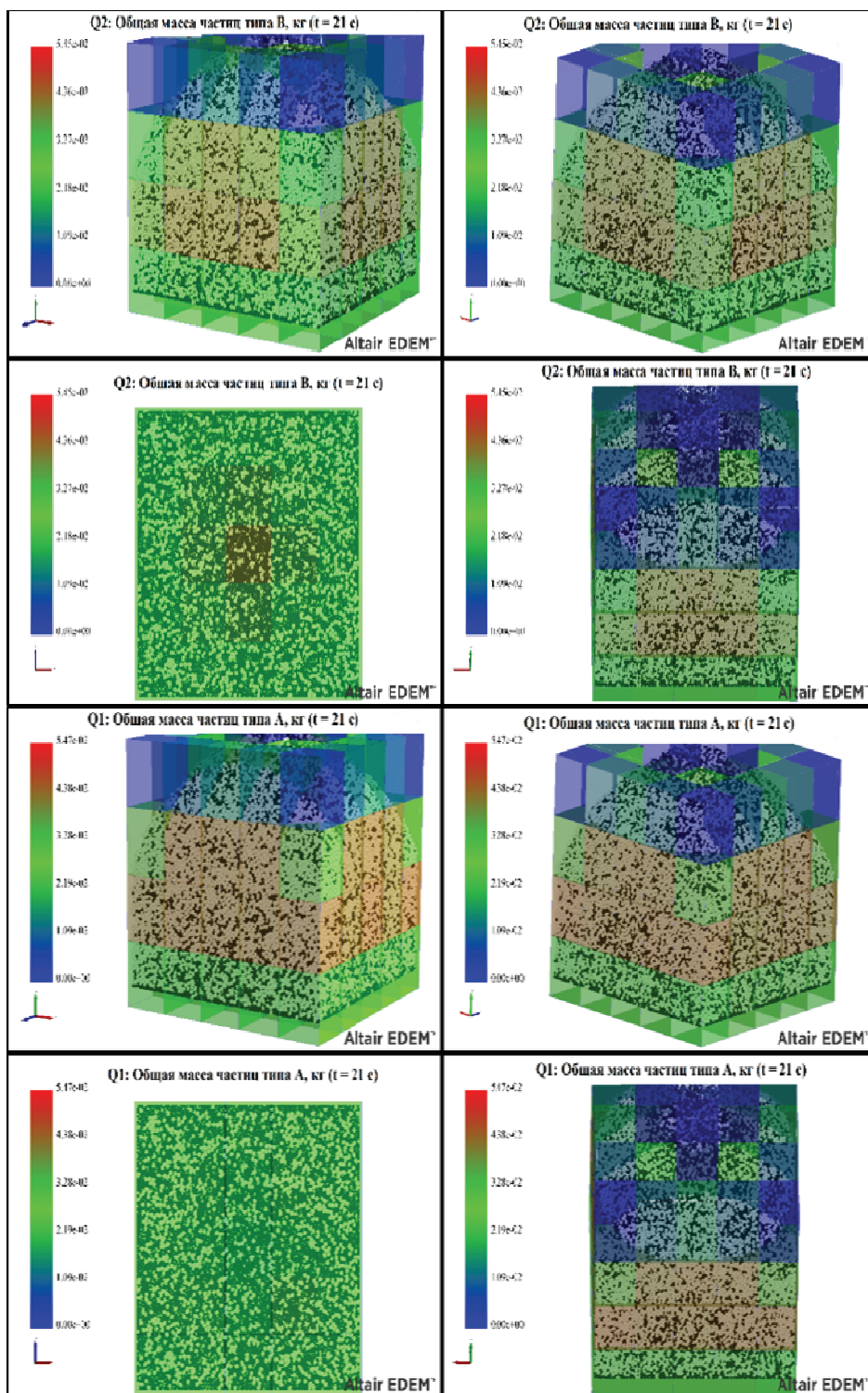


Рис. 3. Установившееся пространственное и количественное распределение частиц сыпучих материалов на выходе из смесителя при различных коэффициентах заполнения при $t = 21$ с

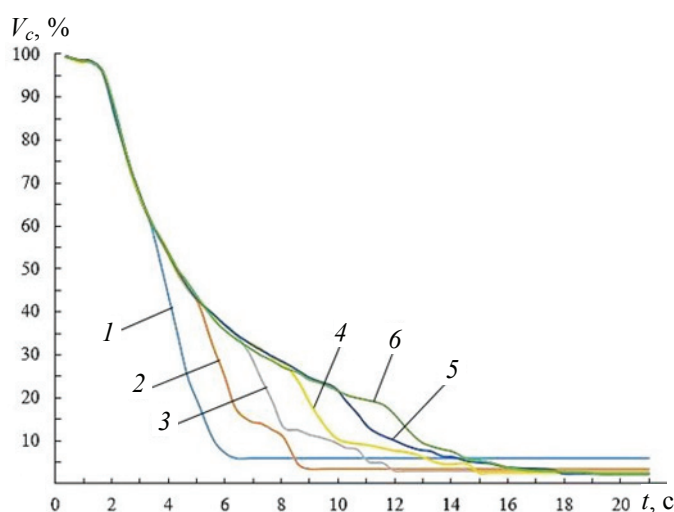


Рис. 4. Зависимость коэффициента неоднородности от времени смешивания при различных значениях коэффициента заполнения смесителя сыпучим материалом:
 1 – $\varphi = 0,061$; 2 – $\varphi = 0,091$; 3 – $\varphi = 0,122$; 4 – $\varphi = 0,152$; 5 – $\varphi = 0,183$; 6 – $\varphi = 0,213$

Начиная примерно с 10...12 с, все кривые выходят на стадию стабилизации и приближаются к низким квазипостоянным значениям коэффициента неоднородности. Такое поведение указывает на достижение квазистационарного состояния смешивания, которое соответствует моменту получения конечной смеси при выходе материала из смесителя. На данной стадии смесь поступает в приемную емкость, где активные механизмы смешивания прекращаются, влияние времени становится незначительным, а пространственное распределение частиц сохраняет достигнутую степень однородности без заметных изменений, что свидетельствует о стабильности конечной смеси в емкости.

Следует отметить, что увеличение коэффициента заполнения смесителя сыпучим материалом приводит к ускорению достижения однородного состояния смеси и, соответственно, снижению конечных значений коэффициента неоднородности. Это объясняется ростом числа контактов и взаимодействий между частицами, что усиливает механизмы диффузии и снижает вероятность формирования локальных неоднородных зон.

На основании полученных результатов EDEM-моделирования на рис. 5 представлена зависимость коэффициента неоднородности V_c , %, от коэффициента заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом. В результате выполненных расчетов установлено, что коэффициент заполнения существенно влияет на перераспределение частиц исходных компонентов в корпусе смесителя, то есть на качество готовой смеси. С увеличением коэффициента заполнения качество смеси улучшается, то есть ее неоднородность уменьшается. И, наоборот, при небольшом коэффициенте заполнения качество смеси ухудшается, что подтверждается большим значением коэффициента неоднородности (см. рис. 5).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при малом коэффициенте заполнения перемешивание протекает неэффективно и частицы распределены по объему смесителя неравномерно. Причиной этого является низкая интенсивность взаимодействия частиц друг с другом. Вследствие этого недостаточность контактов между ними не способствует эффективному перераспределению частиц в объеме смесителя. При увеличении степени заполнения коэффициент неоднородности ощутимо снижается, то есть смесь становится заметно однороднее. Это обусловлено возрастающей частотой столкновения и более интенсивным

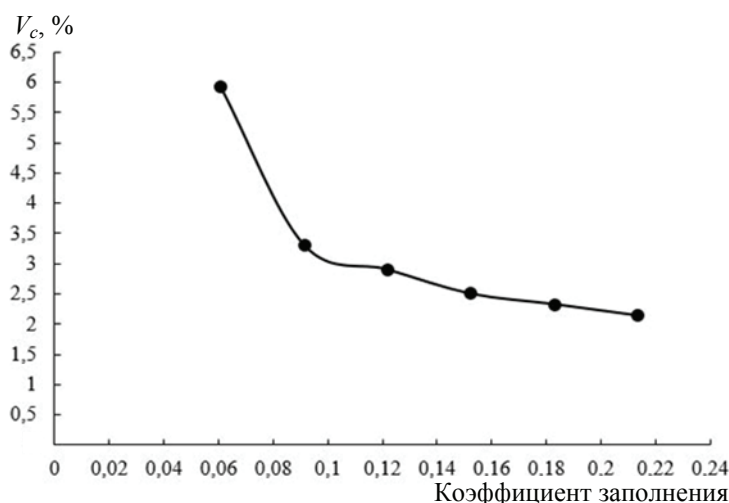


Рис. 5. Зависимость коэффициент неоднородности от коэффициента заполнения смесителя при $t = 21$ с

взаимодействием частиц под действием конвективных потоков, а также за счет их сдвиговых перемещений. Вследствие этого частицы исходных компонентов распределяются по объему смесителя более равномерно.

Однако при достаточно большом коэффициенте заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом наблюдается так называемый эффект стесненного движения частиц, когда движение отдельных частиц ограничено соседними частицами. В моделировании методом EDEM это обычно проявляется в резком снижении кинетической энергии системы: частицы преимущественно находятся в тесном контакте друг с другом без относительного перемещения, то есть без перемешивания [27].

Следовательно, подтверждается факт наличия оптимальной величины коэффициента заполнения, при котором наблюдается взаимное эффективное перемещение частиц в корпусе смесителя, то есть перемешивание сыпучего материала.

Заключение

Проведены анализ процесса смешивания частиц сыпучего материала в многоступенчатом гравитационном смесителе и моделирование смешивания с использованием программного обеспечения Altair EDEM. Установлено, что для исследуемой конструкции каскадного гравитационного смесителя имеется определенный диапазон коэффициента заполнения, при котором смесь характеризуется высокой однородностью и стабильностью.

Полученные результаты дают полезную информацию для повышения эффективности перемешивания сыпучих материалов в многоступенчатом гравитационном смесителе, производительности и совершенствования конструкции гравитационного смесителя.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Баранцева, Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова. – Иваново : Изд-во Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, 2008. – 116 с.

3. Static Mixers in the Process Industries – A Review / R. K. Thakur, C. Vial, K. D. P. Nigam, E. B. Nauman, G. Djelveh // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2003. – Vol. 81, No. 7. – P. 787–826. doi: 10.1205/026387603322302968
4. Машиностроение = Mechanical engineering : Энциклопедия : в 40 томах / Редсовет: Фролов К. В., пред., гл. ред. [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1994. Т. IV-12 : Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Расчет и конструирование машин / ред.-сост. М. Б. Генералов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 829 с.
5. Portillo, P. M. Characterization of continuous convective powder mixing processes / P. M. Portillo, M. G. Ierapetritou, F. J. Muzzio // *Powder Technology*. – 2008. – Vol. 182, No. 3. – P. 368–378. doi: 10.1016/j.powtec.2007.06.024
6. Nienow, A. W. Mixing in the Process Industries / A. W. Nienow, M. F. Edwards, N. Harnby. – Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p.
7. Верлока, И. И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И. И. Верлока, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – № 4-1(31). – 10 с. – URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23282444_34236886.pdf (дата обращения: 20.05.2026).
8. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолюк, С. В. Першина. – Москва : Машиностроение, 2009. – 220 с.
9. Демин, О. В. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов / О. В. Демин, М. М. Свиридов, В. Ф. Першин // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2010. – Т. 53, № 1. – С. 97–99.
10. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов в смесителях гравитационного типа / В. Я. Борщев, Х. Фарур, В. С. Макаров, Г. В. Кокунов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 653–665. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665
11. Гвоздев, А. В. Обзор и анализ конструкций гравитационных смесителей / А. В. Гвоздев, С. В. Огуй // *Технико-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе : материалы IV Международной научно-практической конференции*. – Мелитополь, 2025. – С. 121–125.
12. Сухорукова, Т. А. Современные технологии и оборудование для приготовления смесей сыпучих материалов / Т. А. Сухорукова, В. Г. Божко, В. Я. Борщев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 3. – С. 152–162. doi: 10.24412/2071-6168-2023-3-152-163
13. Борщев, В. Я. Анализ конструкций лопастных смесителей для смешивания склонных к сегрегации сыпучих материалов / В. Я. Борщев, Н. Ц. Гатапова, Г. А. Титов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2025. – Т. 29, № 3. – С. 482–496. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665
14. Кикин, Н. О. Совершенствование процесса смешивания материалов в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами : дис. ... канд. техн. наук : 2.5.21 / Н. О. Кикин. – Белгород, 2023. – 198 с.
15. Мансур, В. Агрегаты для приготовления смеси из компонентов, склонных к сегрегации: современное состояние и перспективы. Часть II / В. Мансур, В. Ф. Першин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 139 – 152. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.139-152
16. Бражник, Ю. В. Совершенствование конструкции и процесса смешивания в лопастном смесителе с высокоскоростным режимом работы : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Ю. В. Бражник. – Белгород, 2017. – 200 с.
17. Патент № 2821456 Российская Федерация, МПК B01F 23/60 (2022.01). Гравитационный смеситель сыпучих материалов : № 2024109721 : заявл.

10.04.2024 : опубл. 24.06.2024 / Борщев В. Я., Фарур Х., Макаров В. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Бюл. № 18. – 11 с.

18. Alian, M. Analysis of the mixing of solid particles in a plowshare mixer via discrete element method (DEM) / M. Alian, F. Ein-Mozaffari, S. R. Upreti // Powder Technology. – 2015. – Vol. 274. – P. 77–87. doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.012

19. Chen, J. Discrete Element Simulation and Validation of a Mixing Process of Granular Materials / J. Chen, M. Furuichi, D. Nishiura // Materials. – 2020. – Vol. 13, No. 5. – P. 1208. doi: 10.3390/ma13051208

20. Krenzer, K. Simulating mixing processes of fresh concrete using the discrete elementmethod (DEM) under consideration of water addition and changes inmoisture distribution / K. Krenzer, V. Mechtcherine, U. Palzer // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 115, No. 2. – P. 274–282. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.012

21. Dhanasekharan, K. Analysis of particle mixing in rotating drums using discrete element method / K. Dhanasekharan, J. Chen // Powder Technology. – 2006. – Vol. 165, No. 1. – P. 45–53.

22. Leveraging Numerical Simulation Technology to Advance Drug Preparation: A Comprehensive Review of Application Scenarios and Cases / Q. Gu, H. Wu, X. Sui, X. Zhang, Y. Liu, W. Feng, R. Zhou, S. Du // Pharmaceutics. – 2024. – Vol. 16, No. 10. – P. 1304. doi: 10.3390/pharmaceutics16101304

23. Zuo, Z. Numerical investigation of granular mixing in an intensive mixer: Effect of process and structural parameters on mixing performance and power consumption / Z. Zuo, S. Gong, G. Xie // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 32, No. 4. – P. 241–252. doi: 10.1016/j.cjche.2020.10.036

24. Лозовой, Н. М. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента неоднородности смеси от технологических параметров в смесителе с изменяющейся рабочей камерой / Н. М. Лозовой, Л. И. Радинская, С. Ю. Лозовая // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(13). – С. 33. – URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40999989_23635079.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

25. Программное обеспечение EDEM. 08.06.2020. – URL : <https://www.edemsimulation.com> (дата обращения: 20.05.2026).

26. Connelly, R. K. Examination of the mixing ability of single and twin-screwMixers using 2D finite element method simulation with particle tracking / R. K. Connelly, J. L. Kokini // Journal of Food Engineering. – 2007. – Vol. 79, No. 3. – P. 956–969. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.03.017

27. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности сегрегации при быстром гравитационном течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов, О. О. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2006. – Т. 40, № 4. – С. 423–425.

Studying the Efficiency of Mixing Bulk Materials in a Cascade Gravity Mixer Using Mathematical Modeling in the Altair EDEM Software Environment

© Hamza Farour¹✉, V. Ya. Borshchev¹, G. A. Titov¹

¹ *Department of Technological Processes, Equipment, and Technosphere Safety,
hamza.faarour@gmail.com; TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: cascade gravity mixer; mix quality; computer modeling; filling factor; nonuniformity coefficient; mixing process; Altair EDEM system; bulk material.

Abstract: Using the discrete element method (DEM) from Altair EDEM software, the effect of mixer fill factor on the mixing quality of bulk materials in a cascade gravity mixer was studied. A series of computer simulations was conducted with varying fill factors of the mixer body with bulk material, while the mixer design, material properties, and particle size distribution remained unchanged. Mixing quality over time was assessed using the nonuniformity coefficient. It is noted that the obtained results can be used to improve the design and functionality of gravity mixers in industries that handle granular bulk materials.

References

1. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for Mixing Bulk Materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
2. Barantseva Ye.A., Mizonov V.Ye., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovaniye, optimizatsiya, raschet* [Processes of Mixing Bulk Materials: Modeling, Optimization, Calculation], Ivanovo: Izdatel'stvo Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta im. V. I. Lenina, 2008, 116 p. (In Russ.)
3. Thakur R.K., Vial C., Nigam K.D.P., Nauman E.B., Djelveh G. Static Mixers in the Process Industries – A Review, *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, vol. 81, no. 7, pp. 787-826. doi: 10.1205/026387603322302968
4. Generalov M.B. [Comp.] *Mechanical engineering*: Entsiklopediya: in 40 vols., Moscow: Mashinostroyeniye, 1994, vol. IV-12: *Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Raschet i konstruirovaniye mashin* [Mechanical engineering: Encyclopedia: in 40 volumes, vol. IV-12: Machines and apparatus for chemical and petrochemical production. Calculation and design of machines], Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 829 p. (In Russ.)
5. Portillo P.M., Ierapetritou M.G., Muzzio F.J. Characterization of continuous convective powder mixing processes, *Powder Technology*, 2008, vol. 182, no. 3, pp. 368-378. doi: 10.1016/j.powtec.2007.06.024
6. Nienow, A. W. Mixing in the Process Industries / A. W. Nienow, M. F. Edwards, N. Harnby. – Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p.
7. Verloka I.I., Kapranova A.B., Lebedev A.Ye. [Modern continuous gravity devices for mixing bulk components], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2014, no. 4-1(31), 10 p. available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23282444_34236886.pdf (accessed 20 May 2026). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Processing of bulk materials in drum-type machines], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 220 p. (In Russ.)
9. Demin O.V., Sviridov M.M., Pershin V.F. [Ways to improve the efficiency of mixing bulk materials], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Bulletin of universities. Chemistry and chemical technology], 2010, vol. 53, no. 1, pp. 97-99. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Borshchev V.Ya., Farur Kh., Makarov V.S., Kokunov G.V. [Ways to improve the efficiency of mixing bulk materials in gravity mixers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 653-665. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Gvozdev A.V., Oguy S.V. *Tekhniko-tekhnologicheskoye obespecheniye innovatsiy v agropromyshlennom komplekse : materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technical and technological support for innovations in the

agro-industrial complex: Proceedings of the IV International scientific and practical conference], Melitopol, 2025, pp. 121-125. (In Russ.)

12. Sukhorukova T.A., Bozhko V.G., Borshchev V.Ya. [Modern technologies and equipment for the preparation of mixtures of bulk materials], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2023, no. 3, pp. 152-162. doi: 10.24412/2071-6168-2023-3-152-163 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Borshchev V.Ya., Gatapova N.Ts., Titov G.A. [Analysis of paddle mixer designs for mixing bulk materials prone to segregation], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 482-496. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Kikin N.O. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Belgorod, 2023, 198 p. (In Russ.)

15. Mansur V., Pershin V.F. [Units for preparing a mixture of components prone to segregation: current status and prospects. Part II], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 139-152. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.139-152 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Brazhnik Yu.V. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Belgorod, 2017, 200 p. (In Russ.)

17. Borshchev V.Ya., Farur Kh., Makarov V.S. *Gravitatsionnyy smesitel' syuchikh materialov* [Gravity mixer for bulk materials], Russian Federation, 2024, Pat. 2821456 (In Russ.)

18. Alian M., Ein-Mozaffari F., Upreti S.R. Analysis of the mixing of solid particles in a plowshare mixer via discrete element method (DEM), *Powder Technology*, 2015, vol. 274, pp. 77-87. doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.012

19. Chen J., Furuichi M., Nishiura D. Discrete Element Simulation and Validation of a Mixing Process of Granular Materials, *Materials*, 2020, vol. 13, no. 5, pp. 1208. doi: 10.3390/ma13051208

20. Krenzer K., Mechtcherine V., Palzer U. Simulating mixing processes of fresh concrete using the discrete elementmethod (DEM) under consideration of water addition and changes inmoisture distribution, *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 115, no. 2, pp. 274-282. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.012

21. Dhanasekharan K., Chen J. Analysis of particle mixing in rotating drums using discrete element method, *Powder Technology*, 2006, vol. 165, no. 1, pp. 45-53.

22. Gu Q., Wu H., Sui X., Zhang X., Liu Y., Feng W., Zhou R., Du S. Leveraging Numerical Simulation Technology to Advance Drug Preparation: A Comprehensive Review of Application Scenarios and Cases, *Pharmaceutics*, 2024, vol. 16, no. 10, pp. 1304. doi: 10.3390/pharmaceutics16101304

23. Zuo Z., Gong S., Xie G. Numerical investigation of granular mixing in an intensive mixer: Effect of process and structural parameters on mixing performance and power consumption, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, vol. 32, no. 4, pp. 241-252. doi: 10.1016/j.cjche.2020.10.036

24. Lozovoy N.M., Radinskaya L.I., Lozovaya S.Yu. [Experimental studies of the dependence of the mixture heterogeneity coefficient on process parameters in a mixer with a variable working chamber], *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Transport engineering and technology], 2019, no. S(13), pp. 33. available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40999989_23635079.pdf (accessed 20 May 2026). (In Russ., abstract in Eng.)

25. Available at: <https://www.edemsimulation.com> (accessed 20 May 2026).

26. Connelly R.K., Kokini J.L. Examination of the mixing ability of single and twin-screwMixers using 2D finite element method simulation with particle tracking,

Journal of Food Engineering, 2007, vol. 79, no. 3, pp. 956-969. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.03.017

27. Dolgunin V.N., Ukolov A.A., Ivanov O.O. [Kinetic regularities of segregation during rapid gravitational flow of granular materials], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 2006, vol. 40, no. 4, pp. 423-425. (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der Effizienz des Mischens von Schüttgütern in einem Kaskaden-Schwerkraftmischer mittels mathematischer Modellierung in der Softwareumgebung Altair EDEM

Zusammenfassung: Mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) der Software Altair EDEM ist der Einfluss des Füllgrades eines Schwerkraftmischers auf die Mischqualität von Schüttgütern untersucht. Es sind Computersimulationen mit unterschiedlichen Füllgraden des Mischerkörpers durchgeführt, wobei die Mischerkonstruktion, die Materialeigenschaften und die Partikelgrößenverteilung unverändert blieben. Die zeitliche Entwicklung der Mischqualität wurde anhand des Ungleichförmigkeitskoeffizienten bewertet. Die Ergebnisse können zur Verbesserung der Konstruktion und Funktionalität von Schwerkraftmischern in Branchen, die mit körnigen Schüttgütern arbeiten, beitragen.

Étude de l'efficacité du mélange des matériaux en vrac dans un mélangeur à gravité en cascade à l'aide de simulations mathématiques dans l'environnement logiciel altair edem

Résumé: A l'aide de la méthode des éléments discrets (DEM) d'Altair EDEM software est étudié l'effet du facteur de remplissage du mélangeur sur la qualité du mélange des matériaux en vrac dans un mélangeur gravitationnel en cascade. Est réalisée une série des simulations informatiques avec différents facteurs de remplissage du corps du mélangeur en vrac, la conception du mélangeur, les propriétés du matériau et la distribution granulométrique des particules étant inchangées. La qualité du mélange au fil du temps est évaluée à l'aide d'un coefficient d'hétérogénéité. Il est à noter que les résultats obtenus peuvent être utilisés pour améliorer la conception et la fonction des mélangeurs à gravité dans les industries utilisant des matériaux granulaires en vrac.

Авторы: *Фарур Хамза* – аспирант кафедры « Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Борицев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры « Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Титов Георгий Анатольевич* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОПОРОШКОВ МОЛНУПИРАВИРА, ПОЛУЧЕННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКОЙ

© В. А. Чмыхова¹✉, А. И. Карченкова²,
А. А. Уварова², М. Г. Гордиенко²

¹ Кафедра экспертизы в допинг- и наркоконтроле, *chmykhova.v.a@muctr.ru*;
² кафедра химического и фармацевтического инжиниринга,
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева», Москва, Российская Федерация

Ключевые слова: активная фармацевтическая субстанция; ингаляционная форма; коронавирус; противовирусный препарат; распылительная сушка.

Аннотация: Проведено исследование растворимости активной фармацевтической субстанции молнупиравира в бинарных смесях растворителей (диметилсульфоксид (ДМСО)/вода и метанол/вода) при различных соотношениях. Установлено, что максимальная растворимость молнупиравира достигается при соотношениях 40:60, 50:50 и 60:40 (ДМСО/вода) и 60:40 (метанол/вода), составляя 0,12 г/мл. В связи с более низкой температурой кипения метанола, что предпочтительнее при сушке состава распылением, выбрана смесь метанол/вода (60:40). Получены четыре образца микропорошков методом распылительной сушки, содержащих молнупиравир, гидроксипропилметилцеллюлозу и разные типы полоксамеров (полоксамер 188 и полоксамер 407). Согласно распределению частиц по размерам, для всех образцов доля фракции 1...5 мкм составляет около 40 % всех частиц. Результаты исследований растворимости порошков, их проницаемости и степени кристалличности не имеют расхождений между собой и, в совокупности с распределением частиц по размерам, позволяют выбрать состав-лидер текущего этапа разработки.

Введение

В декабре 2019 года в городе Ухань (провинция Хубэй, Китайская Народная Республика) были зарегистрированы первые случаи острой респираторной вирусной инфекции неизвестной этиологии. Впоследствии возбудитель был идентифицирован как ранее неизвестный штамм коронавируса – SARS-CoV-2, вызывающий заболевание, получившее название COVID-19. Вирус стремительно распространился как на территории Китая, так и за его пределами, и в марте 2020 года Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) объявила вспышку заболевания пандемией. Согласно официальным заявлениям ВОЗ, общее число подтвержденных случаев смерти, напрямую связанных с клиническими проявлениями COVID-19, к концу 2024 года составило более 7 000 000 человек [1]. Однако важно также оценивать избыточную смертность, включающую как прямые потери населения от вируса, так и косвенные. Согласно расчетным оценкам, упоминаемым в исследовании [2], избыточная смертность примерно в три раза больше числа смертей, непосредственно наступивших от симптомов диагностированного COVID-19.

В 2021 году Управление по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств (США) выдало экстренное разрешение на использование двух пероральных противовирусных препаратов – нирмарелвира и молнупиравира. Молнупиравир показал положительную динамику для пациентов с легкой и средней степенью тяжести течения болезни, имеющих как минимум один фактор риска (пожилой возраст, сердечно-сосудистые заболевания, диабет и т.д.), причем одинаково хорошо работал против различных вариантов SARS-CoV-2, включая дельта-, гамма- и мю-штаммы, что привело к его широкому распространению в терапевтической практике [3].

Молнупиравир – это пролекарство. По своей структуре он является N-гидроксилированным аналогом цитозина, соединенного через атом азота кольца с рибозой, ацилированной изомасляной кислотой (рис. 1), который метаболизируется до аналога рибонуклеозида N-гидроксицитидина (NHC), а он впоследствии фосфорилируется в клетках с образованием фармакологически активного рибонуклеозид-трифосфата (NHC-TP) [3].

Механизм действия молекулы, обеспечивающий ее фармакологические свойства, называется «катастрофа ошибок» и основан на подавлении репродукции вируса, способствуя распространению мутаций при репликации вирусной РНК с помощью РНК-направленной РНК-полимеразы [4].

После введения в организм молнупиравира при его попадании в клетку сложноэфирная связь подвергается гидролизу под действием карбоксилэстераз. Карбоксилэстеразы способны гидролизовать эфирную связь сложных эфиров карбоновых кислот, амидов, тиоэфиров, наибольшее содержание данных ферментов наблюдается в гепатоцитах. Согласно исследованиям [5 – 7], молнупиравир переходит в свою активную форму до попадания в общий кровоток, что означает, что он метаболизируется до попадания в печень. При пероральном приеме молнупиравир гидролизуется карбоксилэстеразами кишечника, в случае его применения в ингаляционной форме аналогичные процессы могут происходить и в клетках легких, поскольку в них также содержатся необходимые ферменты [8].

Коронавирус – это респираторное заболевание, основным очагом поражения которого являются легкие [9]. На данный момент молнупиравир выпускается только в форме перорального препарата, применяемого в клинической практике, в том числе и в России [10]. Рекомендуемая дозировка препарата составляет 1600 мг/сутки (800 мг раз в 12 часов) [11], что объясняется низкой биодоступностью активного метаболита при пероральном введении.

Ингаляционная лекарственная форма молнупиравира представляет интерес, так как данный способ введения может повысить биодоступность лекарственного препарата, снизив время достижения терапевтического действия и уменьшив системную токсичность за счет снижения дозировки и локального действия на наиболее пораженные вирусом органы и ткани. Основные преимущества ингаляционного пути введения: действие в зоне патологического процесса; отсутствие эффекта первого прохождения через печень (следовательно, возможно достижение

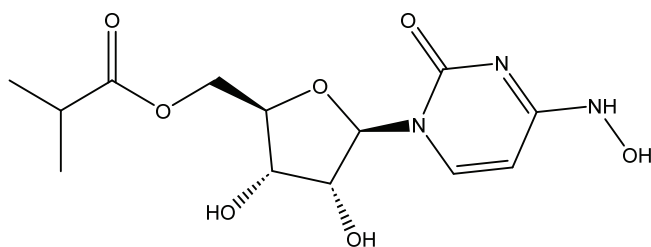


Рис. 1. Структурная формула молнупиравира

большого фармакологического эффекта при меньшей концентрации активной фармацевтической субстанции (АФС) в исходном препарате); более высокая приверженность пациентов к терапии (относительно инвазивных путей введения). Основные недостатки: сложность оценки фактической поступившей дозы лекарственного препарата из-за особенностей дыхания пациентов, влияние легочного клиренса [12].

В качестве метода получения твердой ингаляторной формы выбрана распылительная сушка, обладающая следующими достоинствами: легкость в масштабировании; воспроизводимость; экономичность; однородность получаемых составов; возможность получения порошков с размерами частиц 1...5 мкм, что соответствует размерам частиц ингаляционных препаратов; а также рядом недостатков: не подходит для термочувствительных составов; в зависимости от применяемой методики могут наблюдаться достаточно высокие потери при производстве [13]. В научной литературе опубликованы результаты исследований, которые показывают, что распылительная сушка составов, содержащих плохо растворимую в воде АФС в комбинации с полимерами, позволяет снизить степень кристалличности АФС и тем самым повысить ее растворимость [14].

Материалы и методы

Материалы

Для приготовления экспериментальных образцов использовали следующие вспомогательные вещества: гидроксипропилметилцеллюлозу (ГПМЦ) (Фармасинтез, Россия), полоксамеры 407 (P407) и 188 (P188) (BASF Pharma, Германия). В качестве активной фармацевтической субстанции использовали молнупиравир (Биохимик, Россия). При приготовлении растворов также были использованы диметилсульфоксид (ДМСО) (х.ч., 99,8 %) (Компонент-Реактив, Россия), метанол (ос. ч., 99 %) (Химмед, Россия).

Согласно патенту [15], P407 и P188 применяются в препаратах для ингаляций, диапазон концентраций: от 0,5 до 5 масс. %, наиболее приемлемой является концентрация 1 масс. %, поскольку, согласно экспериментальным данным, увеличение массовой доли полоксамеров выше 1 масс. % существенно не влияет на свойства получаемого состава, но при этом снижает его безопасность [15].

В данном исследовании ГПМЦ применяется в качестве стабилизатора и мукоадгезивного компонента, обеспечивающего пролонгацию времени пребывания препарата в легких и, как следствие, увеличение времени его проникновения в кровь. В исследованиях [16, 17] показан эффект стабилизации перенасыщенных растворов в присутствии ГПМЦ; мукоадгезивные свойства ГПМЦ подтверждены в работах [18, 19]. В исследовании [20] приведены составы порошков для ингаляций двух препаратов: ресвератрола и гинкголида Б, получаемых осаждением АФС в антирастворитель. В качестве стабилизатора в данные составы введена ГПМЦ в концентрациях 0,5 мг/мл и 1,8 мг/мл соответственно. В соответствии с данным исследованием концентрация ГПМЦ, равная 0,015 мг/г, принята, как безопасная для ингаляционного введения.

Методика определения предельной растворимости АФС в водно-спиртовых смесях

Согласно ФС.2.1.0511 [21], молнупиравир легко растворим в ДМСО и метаноле и лишь умеренно растворим в воде, поскольку ГПМЦ, наоборот, имеет более высокую растворимость в холодной воде [22], чем в органических растворителях, необходим подбор соотношения водной и органической фаз для растворения АФС с вспомогательными веществами. В стеклянный стакан вносили ДМСО, метанол и воду в соотношениях, представленных в табл. 1. Суммарный жидкостной

Таблица 1

Составы растворов для оценки растворимости АФС

Номер образца	Объемная доля, %		
	вода	ДМСО	метанол
1	60	40	–
2	50	50	
3	40	60	
4	60	–	40
5	50		50
6	40		60

объем составил 10 мл. Молнупиравир добавляли к смесям растворителей навесками, начиная с $(0,3 \pm 0,001)$ г до суммарной массы всех внесенных навесок, равной $(1,3 \pm 0,02)$ г, с шагом 0,1 г, перемешивая на магнитной мешалке со скоростью 500 об/мин. Наличие или отсутствие растворения фиксировали визуально.

Методика получения образцов методом распылительной сушки

В стеклянный стакан вносили смесь метанола и воды в соотношении 60:40 (объем. %). Последовательно, при постоянном перемешивании на магнитной мешалке вносили навески ГПМЦ, полксамера (P407 или P188), молнупиравира. Итоговый раствор подавали в систему распылительной сушилки Mini Spray Dryer B-290 (Buchi, Швейцария) с установленными параметрами сушки: температурой на входе в камеру 110 °С; мощностью работы аспиратора 85 %; расходом сжатого воздуха, подаваемого на форсунку 50 мм возд. ст.; мощностью вращения вала перистальтического насоса 30 %. Высушенный образец собирали в пенициллиновые флаконы, плотно закрывали резиновой крышкой и обжимали алюминиевой (во избежание контаминации образца в ходе хранения). Параметры сушки значительно влияют на свойства получаемых образцов [23], поэтому контролировались и при необходимости корректировались оператором на протяжении всего процесса наработки.

Методика определения распределения частиц по размерам

Образец, полученный методом распылительной сушки, помещали на предметное стекло, диспергировали и рассматривали под объективами микроскопа MC-50 LED micros (Micros, Австрия) с разным разрешением, с фиксированием результатов с помощью фотографии. Проводили статистическую обработку размеров частиц, запечатленных на микрофотографиях.

Методика определения растворимости образцов

Навески образцов массой 0,025 г вносили в стакан из прозрачного стекла объемом 250 мл, к которым приливали дистиллированную воду в количестве 200 мл. Стакан с навеской и водой помещали на магнитную мешалку, где состав перемешивался на скорости 200 об/мин с отбором проб в следующих временных точках: 15, 30, 45, 60, 360 мин. Определение концентрации активной фармацевтической субстанции в растворах проводилось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на ВЭЖХ-системе Agilent 1220 (Agilent Technologies, Германия) с помощью ранее разработанной методики [24]. Концен-

трацию молнупиравира определяли из уравнения, полученного на основе калибровочной кривой:

$$c_i = \frac{a_i - 361,29}{27643}, \quad (1)$$

где a_i – площадь пика i -го раствора.

Исходя из определенной концентрации, рассчитывали массовую долю от заложенной первоначально массы в определенной временной точке

$$\omega = \frac{c_i \cdot 10n}{m} 100 \%, \quad (2)$$

где n – разбавление; m – масса навески.

Методика определения проницаемости образцов

Исследования проводили на трансдермальном тестере ДНС-6Т (Logan Instruments Corp., США). Навеску образца массой 0,025 г вносили на полупроницаемую целлюлозную мембрану, расположенную сверху ячейки объемом 12 мл и находящуюся в контакте с водой, подогретой до 37 °С. Отбор проб проводили из нижней части ячеек в точках 15, 30, 45, 60, 360 и 720 мин; анализ – методом ВЭЖХ аналогично анализу методики определения растворимости образцов. Расчет концентрации АФС и массовой доли проводили по формулам 1 и 2 соответственно.

Методика определения степени кристалличности образцов

Навеску образца массой 0,015 г помещали в вибрирующий держатель рентгеноструктурного анализатора ВТХ III (Olympus, Япония). Дифрактограммы, данные о площадях пиков получали с помощью программного обеспечения SwiftMin (Olympus, Япония). Степень кристалличности образца X_c , %, определяли, исходя из отношения суммы площадей кристаллических пиков A_c к площади всей дифрактограммы A :

$$X_c = \frac{A_c}{A} 100 \%. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение

При подборе соотношений «вода : органическая фаза (и вид органической фазы)» получены следующие результаты: растворимость в системах 1, 2, 3, 6 – 0,12 г/мл; в системе 5 – 0,10 г/мл; в системе 4 – 0,09 г/мл (расшифровка номеров смесей растворителей по компонентному составу указана в табл. 1).

С точки зрения токсичности и контроля остаточного содержания органических растворителей в лекарственных препаратах смеси с метанолом являются менее предпочтительными, чем с ДМСО, поскольку метанол относится к негенотоксичным растворителям (второй класс), когда ДМСО – к растворителям низкой токсичности (третий класс) [25]. Однако в применяемых условиях технологического процесса важную роль играет летучесть растворителя, поэтому предпочтение отдается смеси «метанол : вода» (60:40), поскольку метанол, в отличие от ДМСО, имеет низкую температуру кипения и при текущих параметрах распылительной сушки может полностью быть удален из раствора.

После выбора комбинации растворителей наработаны образцы, содержащие в своем составе АФС и вспомогательные вещества (ГПМЦ, полоксамеры разных

типов), согласно методике получения образцов методом распылительной сушки (табл. 2). Дополнительно рассчитан выход, %, для каждого из составов по формуле

$$\text{Выход} = \frac{m_n}{m_0} 100 \%, \tag{4}$$

где m_n – масса порошка, полученного распылительной сушкой, г; m_0 – теоретическая масса образца, рассчитанная по массам навесок АФС и вспомогательных веществ, вносимых в объем исходного раствора, г. Выход продукта составил от 59,2 % (образец 1) до 75,2 % (образец 4).

Анализ гранулометрического состава полученных порошков статистическим методом с применением оптической микроскопии показал, что доля фракции, отвечающей размерам частиц ингаляционных порошков, составляет около 40 %, причем наибольшее содержание частиц размером 1...5 мкм наблюдается для образцов № 1 и № 3. Однако для образца № 3, в отличие от других составов, также характерно минимальное содержание частиц с размерами более 10 мкм. Для наглядного представления о распределении размеров частиц посчитаны проценти́ли (табл. 3), построены дифференциальные $\Delta Q/\Delta d$ и интегральные Q_n кривые распределения частиц по размерам (рис. 2).

При анализе растворимости образцов в воде и сравнении их между собой отмечено, что наибольшую растворимость за определенный период демонстрирует образец № 3 (за исключением чистой АФС) (табл. 4).

Полученные результаты также коррелируют с дифрактограммами образцов (рис. 3) и степени их кристалличности (образец 1 – 52,79 %, образец 2 – 64,38 %, образец 3 – 4,09 %, образец 4 – 61,03 %, АФС – 78,24 %). Образец № 3 характеризуется широким гало и отсутствием ярко выраженных пиков, что свидетельствует об аморфности структуры порошка, аналогичные выводы можно сделать и по вычисленной степени кристалличности. Аморфные структуры обладают более высокой растворимостью (относительно кристаллических) из-за обладания большей свободной энергией.

Таблица 2

Массы навесок АФС и вспомогательных веществ составов образцов с АФС

Номер образца	Масса, г		
	ГПМЦ	полоксамер	молнупиравир
1	0,0155	0,0106 (Р407)	1,0003
2	0,0152	0,0548 (Р407)	1,0006
3	0,0153	0,0109 (Р188)	1,0005
4	0,0158	0,0541 (Р188)	1,0006

Таблица 3

Проценти́ли размеров частиц наработанных составов

Характеристика	Диаметр образца, мкм			
	1	2	3	4
D10	2,32	2,32	2,32	2,38
D50	5,92	5,93	5,66	6,03
D90	15,67	15,44	12,00	15,12

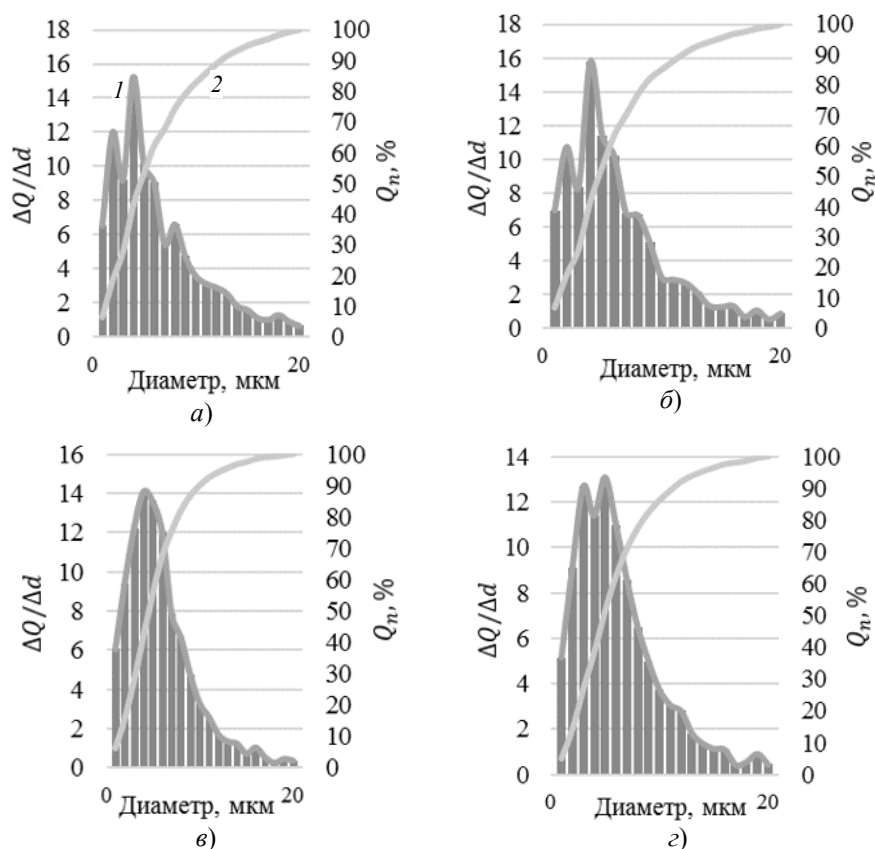


Рис. 2. Дифференциальные (1) и интегральные (2) кривые для образцов:
а – 1; б – 2; в – 3; г – 4

Таблица 4

Результаты растворимости образцов составов, %

Время, мин	Доля от первоначальной массы для образцов				
	1	2	3	4	АФС
15	8,39	11,47	20,03	11,85	82,60
30	9,11	21,56	51,69	42,47	80,56
45	10,21	22,31	72,77	38,72	86,24
60	42,91	18,38	77,56	39,66	88,84
360	49,24	43,57	85,17	40,37	88,84

Результаты исследования проницаемости порошков, полученных распылительной сушкой (табл. 5), схожи с результатами теста растворимости для этих же составов: наибольшей проницаемостью характеризуются образцы № 1 и 3, показавшие проницаемость более 70 % молнупиравира в конечной точке (720 мин). При этом, в первые 60 минут наибольшей проницаемостью обладает образец № 1. Для всех составов характерен линейный рост проницаемости (увеличение доли от заложенной массы АФС, прошедшей через мембрану, %, от времени эксперимента, мин). Данные результаты позволяют предположить, что для ингаляторной формы скорость поступления препарата в кровоток будет не ниже таблетированной.

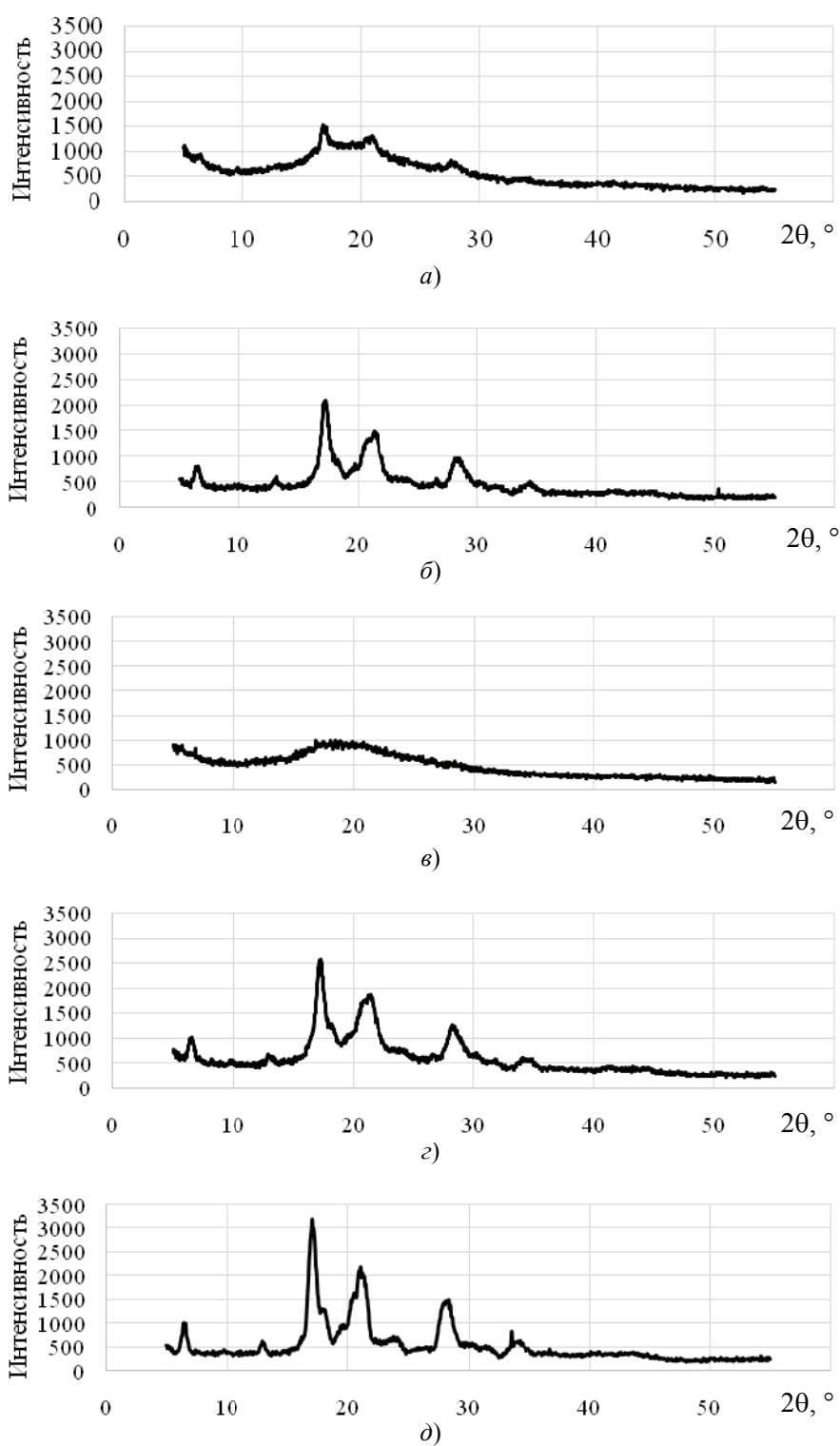


Рис. 3. Дифрактограммы образцов и молниеправителя:
а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – АФС

Таблица 5

Результаты проницаемости образцов, %

Время, мин	Доля от первоначальной массы для образцов				
	1	2	3	4	АФС
15	4,15	6,28	5,68	4,40	2,67
30	9,23	12,08	9,99	9,94	5,10
45	29,50	12,73	9,28	12,54	11,44
60	32,26	13,19	15,05	20,57	15,62
360	31,68	54,31	32,90	37,56	24,94
720	71,78	65,07	72,99	56,47	40,53

По совокупности полученных результатов среди рассматриваемых образцов лидером является образец № 3, обладающий одной из наибольших растворимостей и проницаемостей, а также характеризующийся минимальным содержанием фракции более 10 мкм и аморфной структурой. Однако состав-лидер все еще требует корректировки в области размера частиц (необходимо снижение размера таким образом, чтобы частицы 1...5 мкм стали основной фракцией).

Заключение

В рамках разработки ингаляторной формы молнупиравира проведен ряд исследований, в ходе которых по информации из литературных данных подобраны концентрации вспомогательных веществ и бинарная смесь растворителей, разработаны образцы, содержащие активную фармацевтическую субстанцию. Анализ данных образцов по параметрам (распределению частиц по размерам, растворимости, проницаемости, степени кристалличности) позволил определить состав-лидер – образец № 3, состоящий из молнупиравира, ГПМЦ, Р188, в соотношении 97,5:0,014:0,01. Однако необходимо продолжить разработку состава для достижения показателей, установленных нормативной документацией к данной лекарственной форме, в частности, уменьшения размера частиц до размеров 1...5 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в рамках научной тематики FSSM-2025-0003).

Список литературы

1. COVID-19 epidemiological update, 24 December 2024 // World Health Organization. – Geneva : WHO, 2024. – URL : <https://www.who.int/publications/m/item/covid-19-epidemiological-update---24-december-2024> (дата обращения: 23.02.2026).
2. The WHO estimates of excess mortality associated with the COVID-19 pandemic / W. Msemburi, A. Karlinsky, V. Knutson [et al.] // Nature. – 2023. – Vol. 613. – P. 130–137. doi:10.1038/s41586-022-05522-2
3. Molnupiravir for oral treatment of Covid-19 in nonhospitalized patients / A. Jayk Bernal, M. M. Gomes da Silva, D. B. Musungaie [et al.] // New England Journal of Medicine. – 2022. – Vol. 386, No. 6. – P. 509–520. doi: 10.1056/NEJMoa2116044
4. Molnupiravir: Mechanism of action, clinical, and translational science / B. M. Maas, J. Strizki, R. R. Miller [et al.] // Clinical and Translational Science. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Art. e13732. doi: 10.1111/cts.13732

5. Module 2.7.1. Summary of Biopharmaceutic Studies and Associated Analytical Methods // Pharmaceuticals and Medical Devices Agency (PMDA). Molnupiravir: Clinical summary. – URL : https://www.pmda.go.jp/drugs/2014/P201400046/340278000_22600AMX00561_K100_1.pdf (дата обращения: 23.02.2026).
6. Al-Taie, A. A. Considerations into pharmacogenomics of COVID-19 pharmacotherapy: Hope, hype and reality / A. A. Al-Taie, A. Ş. Büyük, S. Sardas // *Pulmonary Pharmacology & Therapeutics*. – 2022. – Vol. 77. – Art. 102172. doi:10.1016/j.pupt.2022.102172
7. Yan, D. Viral target and metabolism-based rationale for combined use of recently authorized small molecule COVID-19 medicines: Molnupiravir, nirmatrelvir, and remdesivir / D. Yan, B. Yan // *Fundamental & Clinical Pharmacology*. – 2023. – Vol. 37, No. 4. – P. 726–738. doi:10.1111/fcp.12889
8. Presence and inter-individual variability of carboxylesterases (CES1 and CES2) in human lung / M. Gabriele, P. Puccini, M. Lucchi [et al.] // *Biochemical Pharmacology*. – 2018. – Vol. 150, No. 1. – P. 64–71. doi:10.1016/j.bcp.2018.01.028
9. Новая коронавирусная инфекция (COVID-19): клинико-эпидемиологические аспекты / В. В. Никифоров, Т. Г. Суранова, Т. Я. Чернобровкина [и др.] // *Архивъ внутренней медицины*. – 2020. – Т. 10, № 2(52). – С. 87–93. doi:10.20514/2226-6704-2020-10-2-87-93
10. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19) : временные методические рекомендации. Версия 18 (26.10.2023) (утв. Минздравом РФ). – URL : https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/064/610/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V18.pdf (дата обращения: 24.05.2026)
11. Syed, Y. Y. Molnupiravir: First Approval / Y. Y. Syed // *Drugs*. – 2022. – Vol. 82, No. 4. – P. 455–460. doi:10.1007/s40265-022-01684-5
12. Pulmonary inhaled drug delivery systems: From bench to bedside / X. He, J. Zou, W. Zhang [et al.] // *Journal of Controlled Release*. – 2025. – Vol. 388(Pt. 1). – Art. 114296. doi:10.1016/j.jconrel.2025.114296
13. Chaurasiya, B. Dry powder for pulmonary delivery: A comprehensive review / B. Chaurasiya, Y. Y. Zhao // *Pharmaceutics*. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – Art. 31. doi:10.3390/pharmaceutics13010031
14. Pharmaceutical amorphous solid dispersion: A review of manufacturing strategies / S. V. Bhujbal, B. Mitra, U. Jain [et al.] // *Acta Pharmaceutica Sinica B*. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – P. 2505–2536. doi:10.1016/j.apsb.2021.05.014
15. Banov, D. Poloxamer based inhalation composition / D. Banov. – WO 2014205159 A1. – Publ. 24.12.2014.
16. Gao, P. Characterization of supersaturatable formulations for improved absorption of poorly soluble drugs / P. Gao, Y. Shi // *AAPS Journal*. – 2012. – Vol. 14, No. 4. – P. 703–713. doi:10.1208/s12248-012-9389-7
17. Supersaturation and Precipitation Applied in Drug Delivery Systems: Development Strategies and Evaluation Approaches / Y. Gan, J. P. A. Baak, T. Chen [et al.] // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28, No. 5. – Art. 2212. doi: 10.3390/molecules28052212
18. Zhang, Q. Role of Physicochemical Properties of Grades of Hydroxypropyl Methylcellulose on in Vitro Mucoadhesion / Q. Zhang, X. Li, B. R. Jasti // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2021. – Vol. 609, No. 2. – Art. 121218. doi: 10.1016/j.ijpharm.2021.121218
19. Prasher, P. Mucoadhesive Nanoformulations and Their Potential for Combating COVID-19 / P. Prasher, M. Sharma // *Nanomedicine*. – 2021. – Vol. 16, No. 28. – P. 2497–2501. doi:10.2217/nmm-2021-0287

20. Nanocrystals based pulmonary inhalation delivery system: Advance and challenge / P. Yue, W. Zhou, G. Huang [et al.] // *Drug Delivery*. – 2022. – Vol. 29, No. 1. – P. 637–651. doi:10.1080/10717544.2022.2039809

21. Фармакопейная статья ФС.2.1.0511-2021. Молнупиравир // Государственная фармакопея Российской Федерации. – 14-е изд. – Москва : Минздрав России, 2021. – URL : https://e-ecolog.ru/docs/hx8tLeiG-20SgD_YVjtRH?utm_referrer=https%3A%2F%2Fya.ru%2F (дата обращения: 25.05.2026).

22. Rowe, R. C. *Handbook of Pharmaceutical Excipients* / R. C. Rowe, P. J. Sheskey, M. E. Quinn. – 6th ed. – London ; Chicago ; Washington, DC : Pharmaceutical Press; American Pharmacists Association, 2009. – 888 p.

23. Исследование влияния полимерной матрицы и технологических параметров распылительной сушки на свойства порошковой ингаляционной композиции / Л. А. Щербакова, Е. А. Петрикова, М. Г. Гордиенко [и др.] // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 687–696. doi:10.17277/vestnik.2024.04.pp.687-696

24. Sravanti, G. New analytical method development and validation for estimation of molnupiravir in bulk and tablet dosage form by RP-HPLC method / G. Sravanti, K. Gandla, L. Repudi // *Cellular, Molecular and Biomedical Reports*. – 2023. – Vol. 3, No. 3. – P. 130–136. doi:10.55705/cmbr.2023.375093.1087

25. Общая фармакопейная статья ОФС.1.1.0008. Остаточные органические растворители // Государственная фармакопея Российской Федерации. – 15-е изд. – Москва : Минздрав России, 2023. – URL : <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/1/1-1/ostatochnye-organicheskie-rastvoriteli/> (дата обращения: 25.05.2026).

Physicochemical Properties of Molnupiravir Micropowders Produced by Spray Drying

© V. A. Chmykhova¹✉, A. I. Karchenkova², A. A. Uvarova², M. G. Gordienko²

¹ *Department of Doping and Drug Control Expertise, chmykhova.v.a@muctr.ru;*

² *Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering,
D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russian Federation*

Keywords: active pharmaceutical ingredient; inhalation formulation; coronavirus; antiviral drug; spray drying.

Abstract: The solubility of the active pharmaceutical ingredient molnupiravir in binary solvent mixtures (dimethyl sulfoxide (DMSO)/water and methanol/water) at different ratios was studied. It was found that the maximum solubility of molnupiravir was achieved at ratios of 40:60, 50:50 and 60:40 (DMSO/water) and 60:40 (methanol/water), amounting to 0.12 g/ml. Due to the lower boiling point of methanol, which is preferable for spray drying of the composition, a methanol/water mixture (60:40) was chosen. Four samples of micropowders containing molnupiravir, hydroxypropyl methylcellulose and different types of poloxamers (poloxamer 188 and poloxamer 407) were obtained by spray drying. According to the particle size distribution, the 1–5 µm fraction accounts for approximately 40% of all particles for all samples. The results of powder solubility, permeability, and crystallinity studies are consistent and, combined with the particle size distribution, allow us to select the leading formulation for the current stage of development.

References

1. COVID-19 epidemiological update, 24 December 2024 / World Health Organization, Geneva: WHO, 2024, available at: <https://www.who.int/publications/m/item/covid-19-epidemiological-update---24-december-2024> (accessed 23 February 2026).
2. Msemburi W., Karlinsky A., Knutson V. [et al.] The WHO estimates of excess mortality associated with the COVID-19 pandemic, *Nature*, 2023, vol. 613, pp. 130-137, doi:10.1038/s41586-022-05522-2
3. Jayk Bernal A., Gomes da Silva M.M., Musungaie D.B. [et al.], Molnupiravir for oral treatment of Covid-19 in nonhospitalized patients, *New England Journal of Medicine*, 2022, vol. 386, no. 6, pp. 509-520. doi: 10.1056/NEJMoa2116044
4. Maas B.M., Strizki J., Miller R.R. [et al.], Molnupiravir: Mechanism of action, clinical, and translational science, *Clinical and Translational Science*, 2024, vol. 17, no. 2, art. e13732, doi:10.1111/cts.13732
5. Module 2.7.1. Summary of Biopharmaceutical Studies and Associated Analytical Methods, Pharmaceuticals and Medical Devices Agency (PMDA). Molnupiravir: Clinical summary, available at: https://www.pmda.go.jp/drugs/2014/P201400046/340278000_22600AMX00561_K100_1.pdf (accessed 23 February 2026).
6. Al-Taie A.A., Büyük A.Ş., Sardas S. Considerations into pharmacogenomics of COVID-19 pharmacotherapy: Hope, hype and reality, *Pulmonary Pharmacology & Therapeutics*, 2022, vol. 77, art. 102172, doi:10.1016/j.pupt.2022.102172
7. Yan D., Yan B. Viral target and metabolism-based rationale for combined use of recently authorized small molecule COVID-19 medicines: Molnupiravir, nirmatrelvir, and remdesivir, *Fundamental & Clinical Pharmacology*, 2023, vol. 37, no. 4, pp. 726-738. doi:10.1111/fcp.12889
8. Gabriele M., Puccini P., Lucchi M. [et al.] Presence and inter-individual variability of carboxylesterases (CES1 and CES2) in human lung, *Biochemical Pharmacology*, 2018, vol. 150, no. 1, pp. 64-71. doi:10.1016/j.bcp.2018.01.028
9. Nikiforov V.V., Suranova T.G., Chernobrovkina T.Ya. [et al.] [Novel coronavirus infection (COVID-19): Clinical and epidemiological aspects], *Arkhiv" vnutrenney meditsiny* [Archive of Internal Medicine], 2020, vol. 10, no. 2(52), pp. 87-93. doi:10.20514/2226-6704-2020-10-2-87-93 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Available at: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/064/610/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V18.pdf (accessed 24 May 2026)
11. Syed Y.Y. Molnupiravir: First Approval, *Drugs*, 2022, vol. 82, no. 4, pp. 455-460, doi:10.1007/s40265-022-01684-5
12. He X., Zou J., Zhang W. [et al.] Pulmonary inhaled drug delivery systems: From bench to bedside, *Journal of Controlled Release*, 2025, vol. 388(Pt. 1), art. 114296, doi:10.1016/j.jconrel.2025.114296
13. Chaurasiya B., Zhao Y.Y. Dry powder for pulmonary delivery: A comprehensive review, *Pharmaceutics*, 2021, vol. 13, no. 1, art. 31, doi: 10.3390/pharmaceutics13010031
14. Bhujbal S.V., Mitra B., Jain U. [et al.], Pharmaceutical amorphous solid dispersion: A review of manufacturing strategies, *Acta Pharmaceutica Sinica B.*, 2021, vol. 11, no. 8, pp. 2505-2536, doi:10.1016/j.apsb.2021.05.014
15. Banov D. *Poloxamer based inhalation composition*, WO 2014205159 A1, Published Dec 24, 2014.
16. Gao P., Shi Y. Characterization of supersaturatable formulations for improved absorption of poorly soluble drugs, *AAPS Journal*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 703-713, doi:10.1208/s12248-012-9389-7

17. Gan Y., Baak J.P.A., Chen T. [et al.] Supersaturation and Precipitation Applied in Drug Delivery Systems: Development Strategies and Evaluation Approaches, *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 5, art. 2212, doi: 10.3390/molecules28052212
18. Zhang Q., Li X., Jasti B.R. Role of physicochemical properties of some grades of hydroxypropyl methylcellulose on in vitro mucoadhesion, *International Journal of Pharmaceutics*, 2021, vol. 609, no. 2, art. 121218, doi:10.1016/j.ijpharm.2021.121218
19. Prasher P., Sharma M. Mucoadhesive nanoformulations and their potential for combating COVID-19, *Nanomedicine*, 2021, vol. 16, no. 28, pp. 2497-2501, doi: 10.2217/nmm-2021-0287
20. Yue P., Zhou W., Huang G. [et al.] Nanocrystals based pulmonary inhalation delivery system: Advance and challenge, *Drug Delivery*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 637-651, doi:10.1080/10717544.2022.2039809
21. Available at: https://e-ecolog.ru/docs/hx8tLeiG-20SgD_YVjtRH?utm_referrer=https%3A%2F%2Fya.ru%2F (accessed 25 May 2026).
22. Rowe R.C., Sheskey P.J., Quinn M.E. Handbook of Pharmaceutical Excipients, 6th ed., London; Chicago; Washington, DC: Pharmaceutical Press; American Pharmacists Association, 2009, 888 p.
23. Shcherbakova L.A., Petrikova E.A., Gordienko M.G. [et al.], [Investigation of the influence of polymer matrix and spray-drying technological parameters on properties of powder inhalation composition], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 687-696, doi: 10.17277/vestnik.2024.04.pp.687-696 (In Russ., abstract in Eng.)
24. Sravanti, G., Gandla, K., Repudi, L. New analytical method development and validation for estimation of molnupiravir in bulk and tablet dosage form by RP-HPLC method, *Cellular, Molecular and Biomedical Reports*, 2023, vol. 3, no. 3, pp. 130-136, doi: 10.55705/cmbr.2023.375093.1087
25. Available at: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/1/1-1/ostatochnye-organicheskie-rastvoriteli/> (accessed 25 May 2026).
-

Physikalische und chemische Eigenschaften von Molnupiravir-Mikropulvern, gewonnen durch Sprühtrocknung

Zusammenfassung: Es ist die Löslichkeit des pharmazeutischen Wirkstoffs Molnupiravir in binären Lösungsmittelgemischen (Dimethylsulfoxid (DMSO)/Wasser und Methanol/Wasser) in verschiedenen Verhältnissen untersucht. Es ist festgestellt, dass die maximale Löslichkeit von Molnupiravir bei Verhältnissen von 40:60, 50:50 und 60:40 (DMSO/Wasser) sowie 60:40 (Methanol/Wasser) mit 0,12 g/ml erreicht. Aufgrund des niedrigeren Siedepunkts von Methanol, der für die Sprühtrocknung der Zusammensetzung vorteilhaft ist, ist ein Methanol/Wasser-Gemisch (60:40) gewählt. Es sind vier Proben von Mikropulvern, die Molnupiravir, Hydroxypropylmethylcellulose und verschiedene Poloxamere (Poloxamer 188 und Poloxamer 407) enthielten, mittels Sprühtrocknung erhalten. Die Partikelgrößenverteilung ergab, dass die Fraktion von 1–5 µm in allen Proben etwa 40 % aller Partikel ausmacht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Pulverlöslichkeit, Permeabilität und Kristallinität sind konsistent und ermöglichen es uns in Kombination mit der Partikelgrößenverteilung, die vielversprechendste Formulierung für die aktuelle Entwicklungsphase auszuwählen.

Propriétés physico-chimiques des micropoudres de mollupiravir obtenues par séchage par atomisation

Résumé: Est réalisée une étude de la solubilité de la substance pharmaceutique active de molnupiravir dans des mélanges binaires de solvants (diméthylsulfoxyde (DMSO)/eau et méthanol/eau) à différents relations. Est établi que la solubilité maximale du mollupiravir est obtenue à des rapports de 40:60, 50:50 et 60:40 (DMSO/eau) et 60:40 (méthanol/eau), soit 0,12 g/mL. En raison du point d'ébullition inférieur du méthanol, qui est préférable lors du séchage de la composition par pulvérisation, un mélange de méthanol/eau (60:40) est choisi. On a obtenu quatre échantillons de micropoudres par séchage par pulvérisation contenant du mollupiravir, de l'hydroxypropylméthylcellulo-zu et différents types de poloxamères (poloxamère 188 et poloxamère 407). Selon la distribution granulométrique, pour tous les échantillons, la fraction de 1–5 μm est d'environ 40 % de toutes les particules. Les résultats des études sur la solubilité des poudres, leur perméabilité et les degrés de cristallinité n'ont pas de divergence entre eux et, combinés à la distribution de la taille des particules, permettent de choisir la composition-leader de l'étape actuelle de développement.

Авторы: *Чмыхова Варвара Александровна* – магистрант кафедры экспертизы в допинг- и наркоконтроле; *Карченкова Алина Игоревна* – магистрант кафедры химического и фармацевтического инжиниринга; *Уварова Анастасия Анатольевна* – младший научный сотрудник кафедры химического и фармацевтического инжиниринга; *Гордиенко Мария Геннадьевна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Российская Федерация.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНОПРОИЗВОДСТВ ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

© Т. Ю. Ялымова¹✉, Н. Д. Соловьева¹

¹ Кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых, пищевых производств», *Shevchenko.tatyana@list.ru*;
Энгельсский технологический институт (филиал),
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.», Энгельс, Саратовская область, Российская Федерация

Ключевые слова: ионы тяжелых металлов; способы очистки; сточные воды гальванопроизводств; флокулянт; эффективность очистки.

Аннотация: Электрохимические производства являются источником большого количества отработанных водных растворов (сточных вод), которые представляют большую угрозу окружающей среды, загрязняя поверхностные и подземные водоемы. Проведен сравнительный анализ реагентного и ионнообменного способов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов на примере Cu^{2+} , Ni^{2+} . Установлено влияние добавки флокулянта марки PRAESTOL на процесс реагентной (гидрооксидной) очистки модельных растворов от ионов тяжелых металлов. Показано, что ионнообменный способ является более эффективным по сравнению с гидрооксидным.

Введение

Защита водных ресурсов от загрязнения и истощения – это одна из глобальных современных экологических проблем. Причины загрязнения связаны с большим количеством стоков, которые сбрасываются в водоемы и делают воду непригодной для использования [1 – 16]. Электрохимические производства являются источником большого количества отработанных водных растворов, сточных вод, которые представляют большую угрозу для человека и окружающей среды, загрязняя поверхностные и подземные водоемы. Ионы тяжелых металлов (ИТМ), входящие в состав гальванических сточных вод, являются не только вредными и токсичными, но и обладают канцерогенным, мутагенным и даже тератогенным действием [1 – 3].

Существующие методы очистки гальванических сточных вод (механический, реагентный, электрохимический, ионнообменный, мембранный) не позволяют очистить на 100 %. Способ очистки зависит от выбранного критерия. В связи с этим выбор способа очистки и поиск путей их совершенствования является актуальным направлением экологии [1].

В настоящее время, несмотря на разнообразие методов очистки, наиболее распространенным способом обезвреживания гальваностоков остается реагентный метод [1 – 16], заключающийся в обработке гальваностоков химическими соединениями. В результате образуются нерастворимые, малорастворимые и слабодиссоциированные соединения. Ионные реакции, протекающие при этом, прак-

тически необратимы. При выборе реагентов необходимо исходить из произведения растворимости образующихся соединений. С применением осадителей, дающих соединения с малым произведением растворимости, степень очистки воды повышается. Присутствие в воде посторонних солей обычно приводит к возрастанию растворимости образующихся осадков вследствие увеличения ионной силы раствора.

При нейтрализации избыточной кислотности величина pH сточной воды повышается, что сопровождается образованием и осаждением основных солей и гидроксидов металлов. Величина pH, соответствующая осаждению гидроксидов, индивидуальна и зависит от природы металла, концентрации его в растворе, температуры, наличия примесей и др. Наиболее оптимальные значения pH для осаждения гидроксидов металлов приведены в табл. 1.

Ионообменная очистка растворов представляет собой процесс обмена между ионами, находящимися в растворе, и ионами, присутствующими на поверхности твердой фазы материалов, называемых ионитами. В зависимости от знака заряда обменивающихся ионов иониты делятся на катиониты и аниониты. Катиониты задерживают катионы (проявляют кислотные свойства), аниониты задерживают анионы (проявляют основные свойства).

Мембранные методы концентрирования и очистки промышленных стоков являются перспективными [6, 7]. Авторы [8] установили, что степень извлечения ионов Cd из сульфатно-аммонийного электролита кадмирования в стационарных условиях может достигать 99 %.

Цель работы – сравнительный анализ эффективности реагентного и ионообменного способов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов (на примере ионов Cu^{2+} , Ni^{2+}) для исследования возможности их совершенствования.

Выбор веществ для исследования обусловлен тем, что медь и ее соединения относятся ко II и III классу опасности, никель и его соединения – к I и II. Предельно допустимые концентрации (ПДК) этих химических веществ в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования для ионов Cu^{2+}

Таблица 1

**Значения pH гидратообразования
для различных металлов [1, 2]**

Природа иона	Величина pH
Al^{3+}	4,0...5,5
Fe^{3+}	1,7...4,3
Fe^{2+}	5,0...7,2
Cr^{3+}	4,5...7,5
Cu^{2+}	5,5...8,0
Ni^{2+}	6,5...9,4
Zn^{2+}	6,5...10,0
Cd^{2+}	8,0...10,0
Pb^{2+}	7,0...9,0
Sn^{2+}	4,0...4,5

составляет 1 мг/л, для ионов Ni^{2+} – 0,1 мг/л. Указанные тяжелые металлы обладают кумулятивным действием, способны вызывать аллергические реакции, оказывать токсическое действие и обладают канцерогенными и мутагенными свойствами, поэтому очистка растворов от этих ионов является весьма актуальной и важной проблемой экологии. Кроме того, выделение и концентрирование ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} из сточных вод является экономически выгодным и возможно их повторное использование в различных отраслях промышленности [15].

Экспериментальная часть

Объекты исследования – однокомпонентные растворы сернокислой меди и никеля, концентрацией, г/л: 0,5; 1; 2; 3; 5. Оптическая плотность раствора измерялась на фотоэлектроколориметре КФК-3-01 при длинах волн $\lambda = 815,5$ и $950,6$ нм. Для сравнения степени очистки реагентного метода (гидрооксидного) в растворы сернокислой меди, сернокислого никеля добавляли гидроксид натрия (NaOH). Кроме того, исследовалось влияние флокулянта марки PRAESTOL 853 BC (партия 1/1601/20) на процесс очистки гидрооксидным методом. Ионообменную очистку растворов проводили пропусканием через слой катионита КУ-2-8. Для анализа отбирали 10 мл пробы очищаемого раствора (фильтрата). Снова пропускали фильтрат через слой того же катионита. Отбирали пробу 10 мл на анализ. Эксперимент проводили до полного насыщения катионита (3 раза). Фильтрация растворов осуществлялась с помощью обессоленных фильтров «Синяя лента» (ТУ 2642-001-13927158-2003) [12].

Степень очистки α определялась по формуле

$$\alpha = \frac{C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{нач}}} 100\%, \quad (1)$$

где $C_{\text{нач}}$, $C_{\text{кон}}$ – концентрации очищаемого раствора соответственно начальная и после очистки.

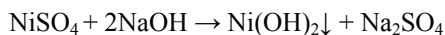
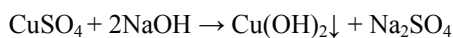
Обсуждение результатов

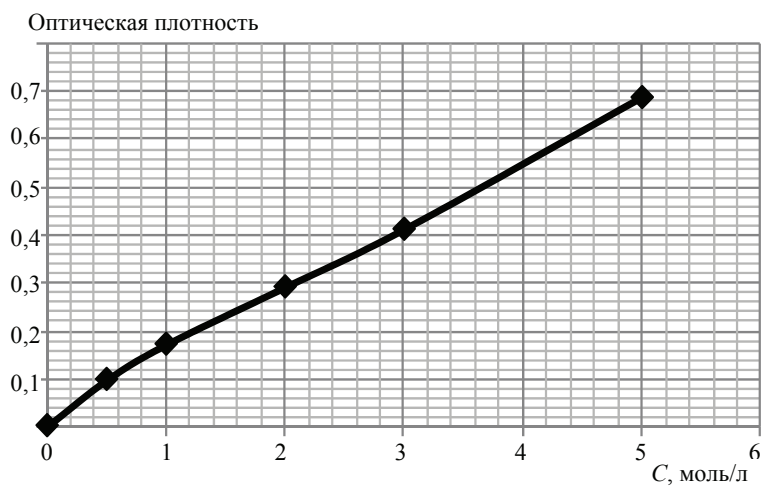
По результатам измерения оптической плотности растворов построены калибровочные кривые (рис. 1). Для исследований процесса очистки выбраны растворы сернокислого никеля и сернокислой меди концентраций 5 г/л. Результаты эксперимента по очистке растворов ионообменным способом после фильтрации представлены в табл. 2. Концентрация растворов после очистки определялась по калибровочным графикам (см. рис. 1).

В результате проведенного эксперимента установлено, что после третьего пропускания раствора через слой катионита степень очистки для ионов меди составляет порядка 84 %, а никеля до 92 %.

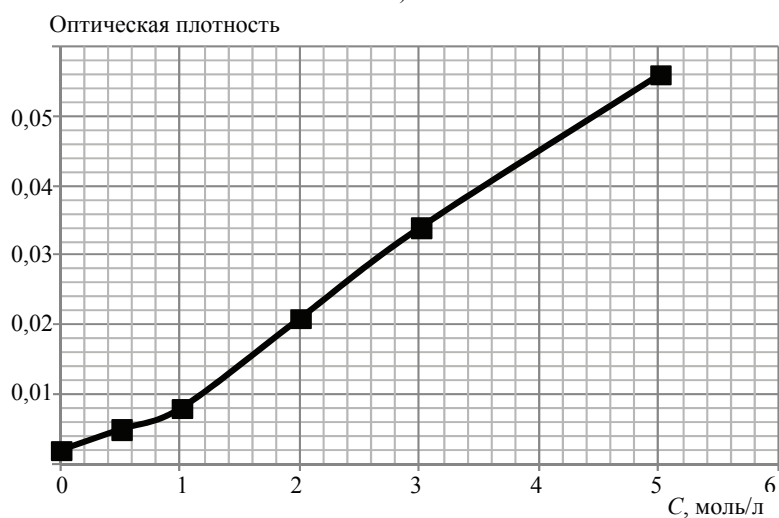
В исследуемые модельные растворы CuSO_4 и NiSO_4 добавляли гидроксид натрия (NaOH), при этом проводилось дозирование щелочи до pH гидратообразования, представленного в табл. 1 [1]. Величина pH раствора определялась при помощи универсальной индикаторной бумаги (ПНД 50-975-84).

Уравнения реакций, протекающих в исследуемых растворах CuSO_4 и NiSO_4 при добавлении щелочи соответственно:





а)



б)

Рис. 1. Калибровочные кривые «оптическая плотность – концентрация» растворов CuSO₄ (а) и NiSO₄ (б)

Таблица 2

**Результаты химического анализа растворов
после очистки ионно-обменным способом**

Проба раствора	Степень очистки α, %, растворов	
	CuSO ₄	NiSO ₄
1	28,9	36,3
2	68,1	80,1
3	84,2	92,0

Таблица 3

**Результаты химического анализа растворов
после очистки реагентным способом**

Раствор	Степень очистки α , %	
	Реагентный способ (NaOH)	Реагентный способ + флокулянт (NaOH + флокулянт)
5 г/л CuSO_4	63,1	78,2
5 г/л NiSO_4	63,5	87,0

После отстаивания растворов и выпадения в осадок гидрооксидов $\text{Cu}(\text{OH})_2\downarrow$ и $\text{Ni}(\text{OH})_2\downarrow$ соответственно проводилось фильтрование растворов с помощью обессоленных фильтров «Синяя лента» (ТУ 2642-001-13927158-2003) и отбор на анализ пробы фильтрата (10 мл).

Одним из способов увеличения эффективности очистки является применение флокулянтов. Как известно [16], флокулянты – это химические реагенты, которые ускоряют отделение примеси от воды склеиванием примесей в хлопьеобразные плотные и крупные флокулы. В результате в очищаемом растворе не остается взвешенных частиц, а осадок легко отделить фильтрацией, осветлением, отстаиванием и др. Ранее для очистки промывных и сточных вод применялись в основном неорганические коагулянты, такие как сульфат алюминия, хлорид железа, в связи с их низкой ценой и широкой доступностью на рынке [16]. В настоящее время полимерные флокулянты (как синтетические, так и природные) приобретают все большую популярность.

Проведено исследование влияния флокулянта серии PRAESTOL на гидрооксидный метод очистки. Катионный флокулянт марки PRAESTOL 853 BC вводился в растворы совместно с реагентом NaOH в концентрации 0,003 %. Следует отметить, что при применении данного химиката (в качестве ускорителя процесса осаждения, флотации и пр.) достаточно всего лишь несколько грамм полимера на 1 м³ очищаемой взвеси. В процессе эксперимента наблюдалось интенсивное образование вязких хлопьеобразных структур, которые сложно поддавались фильтрации.

Результаты эксперимента по очистке изучаемых модельных растворов реагентным способом представлены в табл. 3. Так как в растворах после фильтрации наблюдалось помутнение в виде осадка, проводилось повторное фильтрование, после которого растворы визуально казались прозрачными. Согласно полученным данным, степень очистки гидрооксидным способом в присутствии флокулянта увеличилась для раствора CuSO_4 до 78,2 %, NiSO_4 – до 87 % (см. табл. 3).

Заключение

1. Проведено экспериментальное исследование (сравнительный анализ) эффективности химического (реагентного) и ионообменного способов очистки модельных растворов CuSO_4 и NiSO_4 .
2. Экспериментально установлено, что ионообменный способ оказался наиболее эффективен по сравнению с реагентным (степень очистки составила 84 % для растворов CuSO_4 , 92 % – для NiSO_4).
3. В процессе экспериментального исследования по очистке реагентным способом с добавлением флокулянта марки «PRAESTOL» наблюдалось интен-

сивное образование вязких хлопьеобразных флокул, что свидетельствует об ускорении процесса очистки, однако при этом растворы сложно поддаются фильтрации.

Проведенные эксперименты показывают, что следует продолжить исследования в данном направлении для установления оптимальных параметров процесса очистки. Полученные данные экспериментальных исследований могут быть использованы для усовершенствования технологии очистки.

Список литературы

1. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство : Прил. к журн. «Гальванотехника и обработка поверхности» / С. С. Виноградов ; под. ред. В. Н. Кудрявцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Глобус, 2002. – 352 с.
2. Гальванотехника : справочник / Ф. Ф. Ажогин [и др.] ; под ред. А. М. Гинберга. – Москва : Металлургия, 1987. – 735 с.
3. Resource Utilization of Electroplating Wastewater: Obstacles and Solutions / S. Li, M. Dai, Y. Wu, [et al.] // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2022. – Vol. 8, No. 3. – P. 484–509. doi: 10.1039/D1EW00712B
4. Перельгин, Ю. П. Некоторые вопросы экологии гальванического производства / Ю. П. Перельгин // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2018. – Т. 26, № 2. – С. 57–61. doi: 10.47188/0869-5326_2018_26_2_57
5. Реагентная очистка сточных вод и утилизация отработанных растворов и осадков гальванических производств : учеб. пособие / Ю. П. Перельгин, О. В. Зорькина, И. В. Рашевская [и др.]. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 80 с.
6. Электрокинетические характеристики электродеионизационной очистки и концентрирования технологических растворов гальванических производств, содержащих ионы кобальта, меди и кадмия / С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, М. И. Михайлин, О. С. Филимонова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2025. – Т. 15, № 2(53). – С. 269–278. doi: 10.21285/achb.972
7. Лазарев, Д. С. Кинетические характеристики электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств от ионов Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} / Д. С. Лазарев, И. В. Хорохорина // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 118–128. doi: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.118-128
8. Повышение эффективности электромембранных процессов на участке электрохимического кадмирования / С. С. Кругликов, Е. А. Архипов, Д. А. Жирухин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55, № 3. – С. 286–290. doi: 10.31857/S0040357121030106
9. Влияние режима импульсного электролиза на эффективность очистки растворов от катионов меди / Е. А. Савельева, М. П. Дикун, Н. С. Распопова, Н. Д. Соловьева // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 13. – С. 91–93.
10. Комбинированный способ извлечения меди из отработанного нитратного раствора травления с применением импульсного электролиза / М. П. Ларионова, Н. Д. Соловьева, Е. А. Савельева, Л. Н. Олышанская // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2019. – Т. 27, № 4. – С. 50–56. doi: 10.47188/0869-5326_2019_27_4_50
11. Разработка методов очистки сточных вод машиностроительных и химических производств / С. Л. Фукс, С. В. Хитрин, А. Д. Василевич [и др.] // Advanced Science. – 2017. – № 2(6). – С. 11. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_30146070_67642190.pdf (дата обращения: 21.05.2026).
12. Горбань, Я. Ю. Способы очистки гальванических сточных вод от ионов тяжелых металлов / Я. Ю. Горбань // Аспирант. – 2015. – № 5-1(10). – С. 34–36.

13. Гончаренко, Т. П. Утилизация медьсодержащих растворов методом цементации / Т. П. Гончаренко, Л. И. Жицкая // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 12-5(21). – С. 46–48.

14. Сравнение способов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Е. Р. Мурыгина, С. А. Васильева, Т. Ю. Ялымова, Н. Д. Соловьева // Теоретические и прикладные аспекты электрохимических процессов и защита от коррозии : материалы I Всероссийской научной конференции с международным участием, Казань, 20–23 ноября 2023 г. – Казань, 2024. – С. 58–59.

15. Соколов, Э. М. Антропогенное загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами / Э. М. Соколов, В. М. Панарин, Е. М. Рылеева // Экология и промышленность России. – 2008. – № 11. – С. 4–6.

16. Ульрих, Е. В. Использование флокулянтов для очистки сточных вод / Е. В. Ульрих, А. С. Баркова // Трансформация экосистем. – 2023. – Т. 6, № 1(19). – С. 168–187.

Experimental Study of the Efficiency of Methods for Electroplastic Wastewater Treatment from Heavy Metal Ions

© T. Yu. Yalymova¹✉, N. D. Solovieva¹

¹ *Department of Technology and Equipment for Chemical, Oil and Gas, and Food Production, Shevchenko.tatyana@list.ru; Engels Technological Institute (branch), Yu. A. Gagarin Saratov State Technical University, Engels, Saratov Region, Russian Federation*

Keywords: heavy metal ions; treatment methods; electroplating wastewater; flocculant; treatment efficiency.

Abstract: Electrochemical production processes generate large quantities of wastewater, which pose a significant environmental threat by polluting surface and groundwater bodies. A comparative analysis of reagent and ion-exchange methods for removing heavy metal ions from wastewater is conducted using Cu^{2+} and Ni^{2+} as examples. The effect of adding PRAESTOL flocculant on the reagent (hydroxide) purification of model solutions from heavy metal ions is determined. The ion-exchange method is shown to be more effective than the hydroxide method.

References

1. Vinogradov S.S.; Kudryavtsev V.N. (Ed.) *Ekologicheski bezopasnoye gal'vanicheskoye proizvodstvo* [Environmentally Safe Galvanic Production], Moscow: Globus, 2002, 352 p. (In Russ.)

2. Azhogin F.F. [et al.]; Ginberg A.M. (Ed.). *Gal'vanotekhnika: spravochnik* [Galvanoplasting: Handbook], Moscow: Metallurgiya, 1987, 735 p. (In Russ.)

3. Li S., Dai M., Wu Y., [et al.] Resource Utilization of Electroplating Wastewater: Obstacles and Solutions, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 484-509. doi: 10.1039/D1EW00712B

4. Perelygin Yu.P. [Some Issues of the Ecology of Galvanic Production], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Galvanotechnics and Surface Treatment], 2018, vol. 26, no. 2, pp. 57-61. doi: 10.47188/0869-5326_2018_26_2_57 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Pereygin Yu.P., Zor'kina O.V., Rashevskaya I.V. [et al.]. *Reagentnaya ochistka stochnykh vod i utilizatsiya otrabotannykh rastvorov i osadkov gal'vanicheskikh proizvodstv: ucheb. posobiye* [Reagent Wastewater Treatment and Disposal of Spent Solutions and Sludge from Galvanic Production: A Textbook], Penza: Izdatel'stvo PGU, 2013, 80 p. (In Russ.)
6. Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Mikhaylin M.I., Filimonova O.S. [Electrokinetic characteristics of electrodeionization purification and concentration of process solutions of galvanic production containing ions of cobalt, copper and cadmium], *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* [News of universities. Applied chemistry and biotechnology], 2025, vol. 15, no. 2(53), pp. 269-278. doi: 10.21285/achb.972 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Lazarev D.S., Khorokhorina I.V. [Kinetic characteristics of electron-nanofiltration purification of process solutions of galvanic production from ions of Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 1, pp. 118-128. doi: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.118-128 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Kruglikov S.S., Arkhipov Ye.A., Zhirukhin D.A. [et al.], [Improving the efficiency of electromembrane processes in the electrochemical cadmium plating section], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 2021, vol. 55, no. 3, pp. 286-290. doi: 10.31857/S0040357121030106 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Savel'yeva Ye.A., Dikun M.P., Raspopova N.S., Solov'yeva N.D. [Effect of Pulse Electrolysis Mode on the Efficiency of Solution Purification from Copper Cations], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2016, vol. 19, no. 13, pp. 91-93. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Larionova M.P., Solov'yeva N.D., Savel'yeva Ye.A., Ol'shanskaya L.N. [Combined Method for Copper Extraction from Spent Nitrate Etching Solution Using Pulse Electrolysis], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Galvanotechnics and Surface Treatment], 2019, vol. 27, no. 4, pp. 50-56. doi: 10.47188/0869-5326_2019_27_4_50 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Fuks S.L., Khitrin S.V., Vasilevich A.D. [et al.], [Development of methods for treating wastewater from mechanical engineering and chemical industries], *Advanced Science*, 2017, no. 2(6), pp. 11. available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_30146070_67642190.pdf (accessed 21 May 2026). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Gorban' Ya.Yu. [Methods for purifying galvanic wastewater from heavy metal ions], *Aspirant* [Postgraduate student], 2015, no. 5-1(10), pp. 34-36. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Goncharenko, T.P., Zhitskaya L.I. [Utilization of copper-containing solutions by the cementation method], *Yevraziyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2015, no. 12-5(21), pp. 46-48. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Murygina Ye.R., Vasil'yeva S.A., Yalymova T.Yu., Solov'yeva N.D. *Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty elektrokhimicheskikh protsessov i zashchita ot korrozii: materialy I Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Theoretical and applied aspects of electrochemical processes and corrosion protection: Proceedings of the I All-Russian scientific conference with international participation], Kazan, November 20-23, 2023, Kazan, 2024, pp. 58-59. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Sokolov E.M., Panarin V.M., Ryleyeva Ye.M. [Anthropogenic Pollution of the Environment with Heavy Metals], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 11, pp. 4-6. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Ul'rikh Ye.V., Barkova A.S. [Use of Flocculants for Wastewater Treatment], *Transformatsiya ekosistem* [Transformation of Ecosystems], 2023, vol. 6, no. 1(19), pp. 168-187. (In Russ., abstract in Eng.)

Experimentelle Untersuchung der Effizienz der Verfahren der Reinigung der Abwässer von Schwermetallionen

Zusammenfassung: Elektrochemische Produktionsprozesse erzeugen große Mengen an Abwasser, das durch die Verschmutzung von Oberflächen- und Grundwasser eine erhebliche Umweltgefahr darstellt. Anhand von Cu^{2+} und Ni^{2+} als Beispielen ist eine vergleichende Analyse von Reagenz- und Ionenaustauschverfahren zur Entfernung der Schwermetallionen aus Abwasser durchgeführt. Es ist der Einfluss der Zugabe des Flockungsmittels PRAESTOL auf die Reagenz- (Hydroxid-) Reinigung von Modelllösungen von Schwermetallionen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass das Ionenaustauschverfahren im Vergleich zum Hydroxidverfahren effektiver ist.

Recherche expérimentale de l'efficacité des procédés du traitement des eaux usées de métaux lourds à partir d'ions

Résumé: La production électrochimique est à l'origine d'un grand nombre de solutions aqueuses usées (eaux usées) qui constituent une grande menace pour l'environnement en polluant les eaux de surface et des réservoirs souterrains. Est réalisée une analyse comparative du réactif et des méthodes d'échange d'ions pour traiter les eaux usées à partir d'ions de métaux lourds à l'exemple de Cu^{2+} , Ni^{2+} . Est établi l'effet de l'additif flocculant praestol sur le processus de purification réactif (hydrooxyde) des races modèles à partir d'ions de métaux lourds. Est démontré que la méthode d'échange d'ions est plus efficace par rapport à l'hydrooxyde.

Авторы: *Ялымова Татьяна Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых, пищевых производств»; *Соловьева Нина Дмитриевна* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых, пищевых производств», Энгельсский технологический институт (филиал), ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.», Энгельс, Саратовская область, Российская Федерация.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ
И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАЛКОВЫХ МАШИН
НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА
РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ
ИХ ПЛАСТИКАЦИИ**

© М. В. Соколов¹✉, П. С. Беляев², Д. В. Туляков³

¹ Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
msok68@mail.ru;

² Кафедра «Материалы и технология»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;

³ ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: межвалковый зазор; пластичность резиновых смесей; скорчинг; суммарная величина сдвига при вальцевании; условная прочность при разрыве; фрикция.

Аннотация: Рассмотрено влияние конструктивных и технологических параметров валковой машины при периодическом и непрерывном режимах пластикации резиновой смеси марки НО-68-1 на показатели ее качества, такие как условная прочность при разрыве, пластичность, скорчинг. Отмечено, что при непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси достигаются стабильно лучшие показатели качества за меньшее время пластикации. С целью выбора параметров управления при оптимизации процесса вальцевания и конструкции рабочих органов валковых машин для переработки резиновых смесей в непрерывном режиме их пластикации, установлен характер и вес влияния основных технологических и конструктивных параметров между собой на функции состояния, то есть их корреляция.

Введение

Главными преимуществами непрерывной схемы пластикации перед периодической (внутренние смесители Бенбери) являются: стабильность показателей качества резиновой смеси, то есть нет «истории» состояния резиновой смеси как в отдельных порциях, а, именно, показатели качества метра ленты в начале и в конце смены идентичны, если система вышла на стационарный режим, что в свою очередь критично для массового производства однотипных резинотехнических изделий (**РТИ**). Затраты энергии на единицу продукции в правильно настроенном непрерывном режиме пластикации на 15 – 25 % меньше, чем при периодическом, то есть нет циклов «разгон-остановка», меньше холостых потерь. Также имеется потенциал автоматизации – прямая интеграция с экструдерами, каландрами, линиями вулканизации.

Но при непрерывном режиме пластикации резиновых смесей на валковых машинах могут возникать сложности организации процесса, такие как «прилипа-

ние» смеси к валам из-за неточной геометрии валков, низкой шероховатости их поверхности, наличия градиента температур по длине валка, что необходимо прогнозировать расчетами по математической модели. Неправильный тепловой режим не позволит получить гладкую ленту, а приведет к образованию «кваного блина», который рвется на транспортере. Резина течет как жидкость, но помнит как твердое тело. Это не металл, ее нельзя просто расплавить и отлить. Механо-химические процессы при деформации сдвига необратимы. Однажды перегревшаяся смесь уже не восстановится.

В качестве функций состояния принимали такие показатели качества резиновой смеси, как условная прочность при разрыве f_p ; пластичность Пл (показатель качества, зависящий обратно пропорционально от скорчинга [1]) и сдвиг при вальцевании γ_v [2], которые в свою очередь зависят от конструктивных и технологических параметров процесса пластикации на валковых машинах по уравнениям математической модели, изложенной в книге [3].

Влияние конструктивных и технологических параметров валковой машины проведено на примере непрерывного режима пластикации резиновой смеси НО-68-1 со следующими теплофизическими и реологическими параметрами: плотность $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; теплопроводность $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; теплоемкость $c = 2300 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$; при неизотермическом режиме вальцевания: мера консистенции $m_0 = 600 \text{ кПа} \cdot \text{с}^n$; индекс течения $n = 0,2$; начальная температура резиновой смеси на входе $T_{\text{см.вх}} = 323 \text{ К}$; температура поверхности валков $T_{\text{ц}} = 358 \text{ К}$.

Выбор параметров управления проводился по результатам анализа функций состояния, расчет которых осуществлялся с помощью программного обеспечения для ЭВМ [4], разработанного на основе математической модели процесса экструзии резиновых смесей [3].

Исследования с помощью методов имитационного моделирования по оценке влияния режимных переменных (фрикции f , частоты вращения валка вальцов u) и конструктивных параметров валковой машины (минимального межвалкового зазора $h_{0в}$, диаметра валков D_v , длины рабочей части валков L_v) на процесс непрерывного вальцевания с учетом качества пластика (величины сдвига) резиновых смесей показаны на рис. 1 – 8, где приведены зависимости физико-механических показателей от частоты вращения валков при попарно сочетающихся различных значениях величин фрикции f , минимального межвалкового зазора $h_{0в}$, а именно:

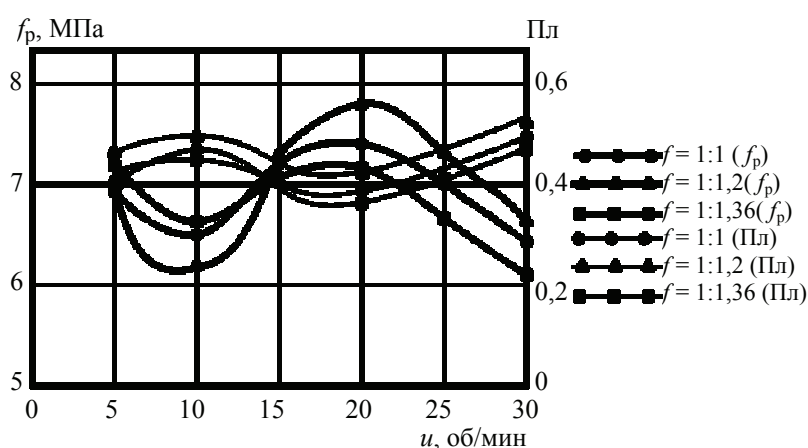


Рис. 1. Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{0в} = 1,5 \text{ мм}$, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы вальцов

зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{0в} = 1,5$ мм, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы валцов; зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$ при различных значениях межвалкового зазора $h_{0в}$ и непрерывном режиме работы валцов; зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режимах работы валцов; зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл от величины суммарного сдвига γ_v , полученные на валцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) и промышленных валцах ЛБ 320/320 550.

Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{0в} = 1,5$ мм, различных значений фрикции ($f = 1:1,1; 1:1,2; 1:1,36$) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА показаны на рис. 1, из которого видно, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности соответствуют фрикции $f = 1:1,2$ и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 2 показаны зависимости предела условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$, различных значениях минимального межвалкового зазора ($h_{0в} = 1,0; 1,5; 2$ мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА. Экспериментальные исследования показали, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$, минимальному межвалковому зазору $h_{0в} = 1,5$ мм и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 3 представлены зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режиме работы валцов на примере резиновой смеси шифра НО-68НТА. Лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

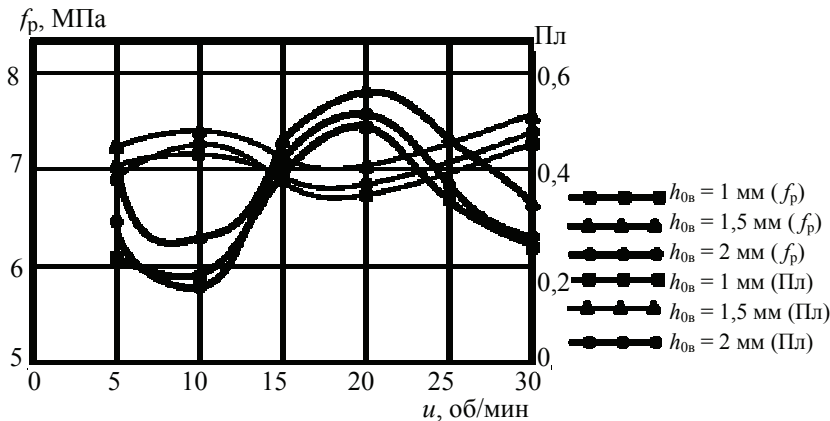


Рис. 2. Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$ различных значениях межвалкового зазора $h_{0в}$ и непрерывном режиме работы валцов

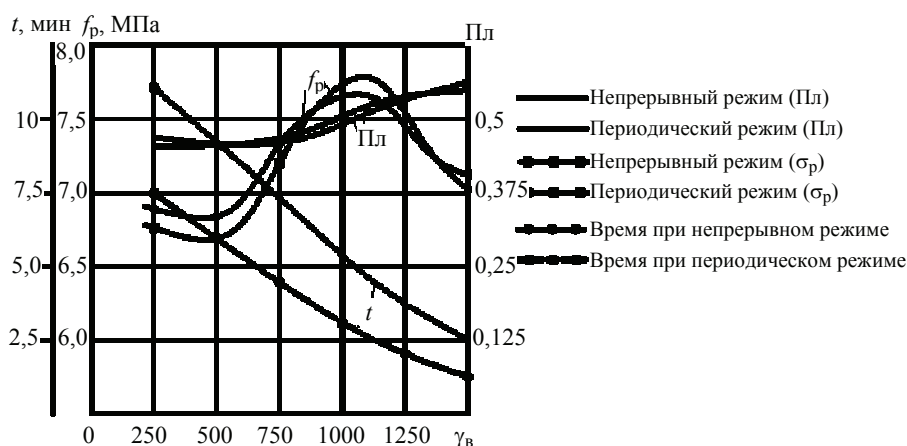


Рис. 3. Зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластика резиновой смеси шифра НО-68НТА проведены экспериментальные исследования на вальцах с диаметром валков 320 мм и их рабочей длиной 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических показателей пластика f_p , Пл от величины сдвига γ_v , показанные на рис. 4, в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2.

Наилучшие физико-механические показатели пластика резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига γ_v , как и при экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах СМ 320/320 550 (см. рис. 4). Расхождение между физико-механическими показателями составили не более 9 %.

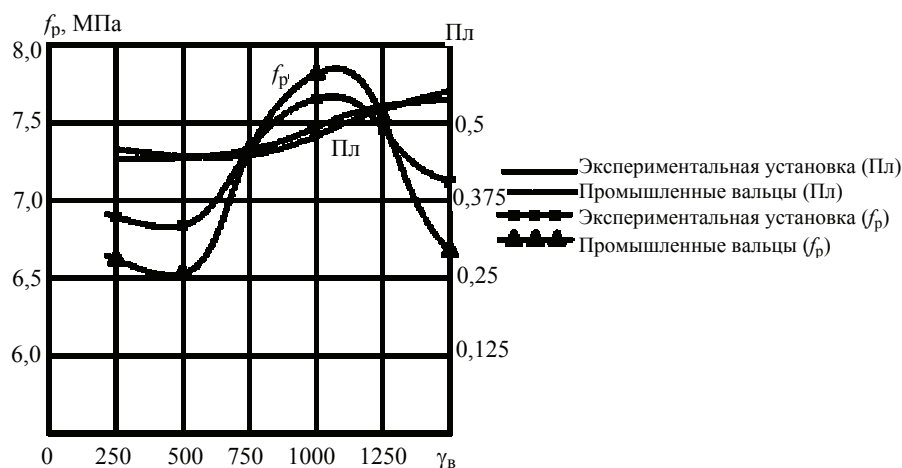


Рис. 4. Зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл от величины суммарного сдвига γ_v , полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550

На рисунке 5 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_0 = 1,5$ мм, различных значений фрикции ($f = 1:1,1; 1:1,2; 1:1,36$) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси ИРП-6721. Анализ экспериментальных данных показывает, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$ и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 6 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$, различных значениях межвалкового зазора ($h_0 = 1,0; 1,5; 2$ мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси ИРП-6721. Максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$, минимальному межвалковому зазору $h_{0в} = 1,5$ мм и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

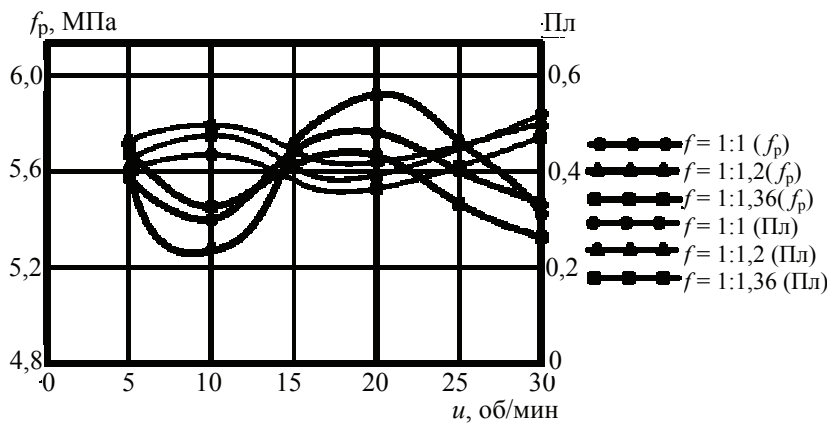


Рис. 5. Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_0 = 1,5$ мм, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы вальцов

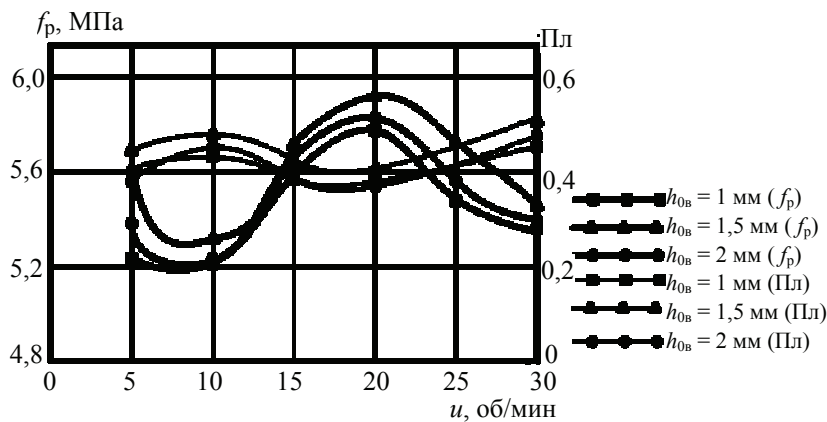


Рис. 6. Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$, различных значениях минимального межвалкового зазора $h_{0в}$ и непрерывном режиме работы вальцов

На рисунке 7 представлены зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режимах работы валцов на примере резиновой смеси шифра ИРП-6721. Лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластика резиновой смеси шифра ИРП-6721 проведены эксперименты на валцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических свойств пластика f_p от величины сдвига γ_v (см. рис. 7), в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2 [3].

Наилучшие физико-механические показатели пластика резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига γ_v , как и при экспериментальных исследованиях на промышленных валцах ЛБ 320/320 550 (рис. 8). Расхождение между физико-механическими показателями составили не более 7 %.

Известно, что при непрерывном вальцевании полимерных материалов полезная мощность и производительность валцов зависят от величины объема материала, находящегося на валках валцов, определяемого их размерами; частоты вращения валков; зазора и фрикции между ними; температуры переработки и реологии перерабатываемого материала [3]. Полезная мощность определяется удельной мощностью P , которая показывает эффективность работы валцов, то есть если вести процесс непрерывного вальцевания при максимальном ее значении, то вся механическая энергия расходуется на пластикацию перерабатываемого материала. Максимальное значение удельной мощности определяется величиной безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки $X_{нн}$ для каждого конкретного индекса течения перерабатываемого материала.

Таким образом, существующая очевидная взаимосвязь между величиной объема материала, находящегося на валках валцов, их размерами, частотой вращения валков, зазором и фрикцией между ними, температурой переработки

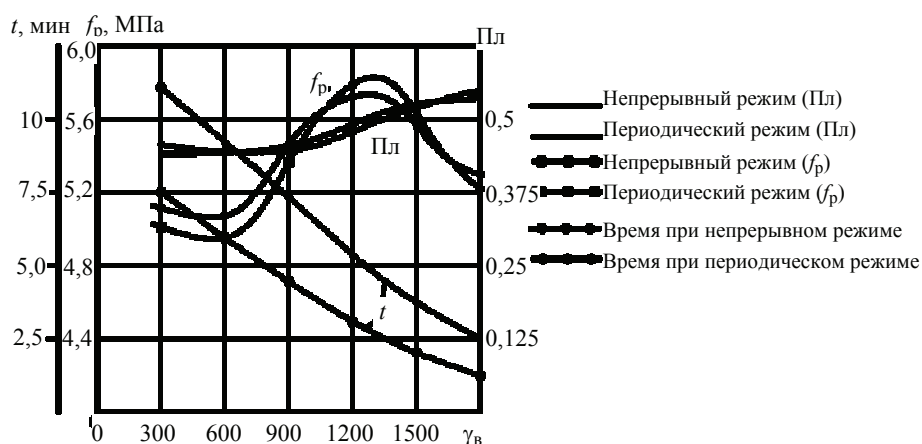


Рис. 7. Зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режимах работы валцов: $f = 1; 1,2$; $h_{0в} = 1,5$ мм

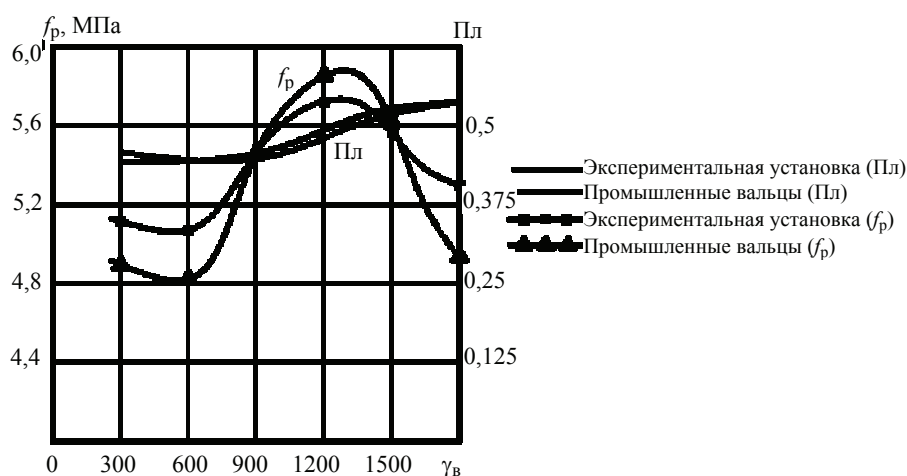


Рис. 8. Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от величины суммарного сдвига γ_v , полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550

и реологии перерабатываемого материала [3] позволяет не проводить методами имитационного моделирования исследования влияния режимных переменных и конструктивных параметров на величину полезной мощности и производительность вальцов.

Заключение

На основе анализа зависимостей (см. рис. 1 – 8) и существующей очевидной взаимосвязи между величиной объема материала, находящегося на вальцах вальцов, установлено, что режимные переменные (f , u) и конструктивные параметры валкового оборудования ($h_{0в}$, D_v , L_v) являются примерно равновесными.

Список литературы

1. Влияние подвулканизации на относительное изменение размеров длинномерных резинотехнических заготовок / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. Серия: Технические науки. – 2008. – № 2(12), Т. 2. – С. 116–120.
2. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин, И. В. Шашков, П. С. Беляев, Д. В. Туляков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870–881.
3. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. К. Скуратов, В. Г. Однолько. – Москва : Машиностроение, 2009. – 352 с.
4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008613114 Российская Федерация. Расчет интегрального критерия качества – суммарной величины сдвига для непрерывного вальцевания : № 2008612201 : заявл. 19.05.2008 : регистрация 27.06.2008 / С. С. Гуреев, Д. Л. Полушкин, М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев; Тамб. гос. техн. ун-т.

The Influence of Operating Variables and Design Parameters of Roll Machines on Energy Consumption and Quality Indicators of Rubber Compounds under Continuous Plasticization

© M. V. Sokolov¹✉, P. S. Belyaev², D. V. Tulyakov³

¹ Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
msok68@mail.ru;

² Department of Materials and Technology, TSTU, Tambov, Russian Federation;

³ Tambov Business College, Tambov, Russian Federation

Keywords: inter-roll gap; rubber compound plasticity; scorching; total shear during rolling; tensile strength; friction.

Abstract: The influence of the design and process parameters of a rolling machine for intermittent and continuous plasticization of NO-68-1 rubber compound on its quality indicators, such as tensile strength, plasticity, and scorching, is examined. It is noted that continuous rolling of the rubber compound consistently achieves better quality indicators with a shorter plasticization time. To select control parameters for optimizing the rolling process and the design of the working elements of rolling machines for processing rubber compounds in continuous plasticization mode, the nature and significance of the influence of the main process and design parameters on the state functions, i.e., their correlation, is determined.

References

1. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Odnol'ko V.G. [The Effect of Scorch on the Relative Change in the Dimensions of Long Rubber Industrial Blanks], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. Series: Technical Sciences], 2008, no. 2(12), vol. 2, pp. 116-120. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of Integral Quality Criteria in the Processing of Polymeric Materials by the Roller-Auger Method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Skuratov V.K., Odnol'ko V.G. *Metodologiya rascheta oborudovaniya dlya proizvodstva dlinnomernykh rezinotekhnicheskikh zagotovok zadannogo kachestva* [Methodology for Calculating Equipment for the Production of Long Rubber Blanks of Specified Quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)
4. Gureyev S.S., Polushkin D.L., Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S. *Raschet integral'nogo kriteriya kachestva – summarnoy velichiny sdviga dlya nepreryvnogo val'tsevaniya* [Calculation of the Integral Quality Criterion – the Total Value of Shear for Continuous Rolling], Certificate of Official Registration of the Computer Program No. 2008613114 Russian Federation (In Russ.)

Einfluss von Prozessvariablen und Konstruktionsparametern von Walzmaschinen auf den Energieverbrauch und die Qualitätsindikatoren von Gummimischungen im kontinuierlichen Modus ihrer Plastifizierung

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss der Konstruktions- und Prozessparameter einer Walzmaschine zur periodischen und kontinuierlichen Plastifizierung der Kautschukmischung NO-68-1 auf deren Qualitätsmerkmale wie Zugfestigkeit, Plastizität und Anbrennen untersucht. Es ist gezeigt, dass durch kontinuierliches Walzen der Kautschukmischung stabil bessere Qualitätsmerkmale bei kürzerer Plastifizierungszeit erzielt werden. Um die Steuerungsparameter zur Optimierung des Walzprozesses und die Konstruktion der Arbeitselemente von Walzmaschinen für die Verarbeitung von Kautschukmischungen im kontinuierlichen Plastifizierungsmodus auszuwählen, sind Art und Bedeutung des Einflusses der wichtigsten Prozess- und Konstruktionsparameter auf die Zustandsfunktionen, d. h. deren Korrelation, festgelegt.

Influence des variables de régime et des paramètres de conception des machines à rouleaux sur la consommation d'énergie et les indicateurs de qualité des mélanges de caoutchouc en mode continu de leur plastification

Résumé: Est examiné l'impact des paramètres structurels et technologiques de la machine à rouleaux dans les modes périodiques et continus de la plastification du mélange de caoutchouc NO-68-1 sur ses indicateurs de qualité, tels que la résistance à la rupture conditionnelle, la plasticité, le scorching. Il est à noter que le laminage continu du mélange de caoutchouc permet d'obtenir des performances stables et de meilleure qualité en moins de temps de plastification. Afin de choisir les paramètres de contrôle lors de l'optimisation du processus de laminage et de la conception des organes de travail des machines à rouleaux pour le traitement des mélanges de caoutchouc en mode continu de leur plastification, sont établis la nature et le poids de l'influence des paramètres technologiques et structurels fondamentaux entre eux sur les fonctions de l'état, c'est-à-dire leur corrélation.

Авторы: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; *Туляков Денис Валерьевич* – преподаватель ТОГАПОУ «Тамбовский бизнес-колледж», Тамбов, Российская Федерация.

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ
И ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ**

© О. А. Киселева¹✉, В. П. Ярцев¹

¹ Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», kiseleva_oa@rambler.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: деформация; долговечность; древесные композиты; переменное нагружение; прочность; усталость; циклическое нагружение.

Аннотация: На примере древесностружечных плит и ламината изложена взаимосвязь деформационных процессов и прочности. Учтено влияние различных параметров (температуры, скорости и уровня нагружения) на данные процессы. Изучено влияние циклического нагружения на прочность древесно-стружечных плит и фанеры. Подобрана продолжительность отдыха между циклами нагружения, позволяющая продлить продолжительность жизни материалов. Рассмотрены длительные испытания древесных композитов в режиме циклических испытаний и переменных нагрузок.

Введение

Строительная механика часто рассматривает работу материала под действием постоянной температуры. Однако в процессе эксплуатации работа материала более сложная. Он может находиться как в нагруженном состоянии, так и в стадии отдыха. Кроме того, уровень нагрузки также может постоянно меняться.

Под действием нагрузки в материале параллельно идут два процесса: разрушение и деформирование, причем второй всегда предшествует процессу разрушения. Рассмотрим деформационные процессы более подробно. Деформации подразделяются на упругие, полные и остаточные (необратимые). Упругими считаются деформации, которые полностью исчезают после снятия нагрузки. Остаточные же деформации остаются в материале, причем они возникают уже при малых величинах полной деформации. Насколько велика будет полная деформация и какова упругая определяется структурой материала. В древесных композициях деформации возникают за счет разрушения в зонах контакта древесины со связующим [1]. Нельзя оставлять без внимания и уровень действующей нагрузки.

При построении графиков, учитывающих взаимосвязь деформационных процессов и прочности как на стадии нагружения, так и на стадии разгрузки, получаются кривые, напоминающие собой «петли гистерезиса». Площадь внутри такого графика соответствует механической работе, большая часть которой переходит в тепловую энергию. Также здесь образуется энергия деформации последствия и небольшая часть свободной энергии высокоэластической деформации [1].

При этом с увеличением деформации растет количество работы, переходящей в тепло и приводящей к разогреву материала, который в свою очередь может привести к снижению прочности и химическим изменениям материала [1, 2]. Поэтому механические потери должны быть сведены к минимуму.

Цель работы – изучение деформационных процессов и многократного нагружения на примере трех материалов: ДСП, ламината и фанеры.

Методология проведения исследования

Первая серия испытаний проводилась при сжатии в режиме заданных скоростей нагружения (разгрузки) и постоянных температур. В процессе испытаний фиксировали изменение деформации ε от напряжения σ . Полученные результаты представляют собой «петли гистерезиса».

Вторая серия испытаний направлена на изучение циклического влияния нагрузки на прочность материала при поперечном изгибе. В данном случае в течение одного экспериментального цикла чередовались процессы нагружения (30 мин) и отдыха, когда образец оставался без нагрузки. Отдых принимался равным 2 мин, 15 мин, 30 мин, 1 ч и 1 сут. Само количество циклов варьировалось от 2 до 30.

Рассмотрены также долговременные испытания материалов, которые проводились при поперечном изгибе – *третья серия испытаний*. В данном случае образцы подвергались нагрузке, повторяющейся в течение некоторого количества циклов. При этом в ходе испытаний для каждого образца фиксировалось время его жизни под нагрузкой. Дополнительно перед каждым последующим нагружением фиксировали величину прогиба.

Затем образцы подвергались действию длительных нагрузок (*четвертая серия*), но при этом постоянно изменялся их уровень. Температура поддерживалась строго постоянной на уровне 20 °С. Испытания велись при поперечном изгибе и при этом фиксировалось время до разрушения материала. По полученным данным построены зависимости изменения долговечности от прочности.

Ранее получены зависимости изменения долговечности от прочности (характерной для постоянного уровня нагружения), которые представлены классическим уравнением долговечности [3, 4]

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right], \quad (1)$$

где τ_m, U_0, γ, T_m – физические константы материала: τ_m – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов), с; U_0 – максимальная энергия активации разрушения, кДж/моль; γ – структурно-механическая константа, кДж/(моль×МПа); T_m – предельная температура существования твердого тела (температура разложения), К; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль×К); τ – время до разрушения (долговечность), с; σ – напряжение, МПа; T – температура, К.

Расчет констант, входящих в уравнение (1), осуществляется по методике, представленной в работе [3].

Результаты проведенного исследования

На примере древесностружечных плит и ламината проследим взаимосвязь полной деформации с остаточной, а также влияние температуры и скорости нагружения на их основные деформационно-силовые параметры. Полученные графики представляют собой «петли гистерезиса» (рис. 1 и 2).

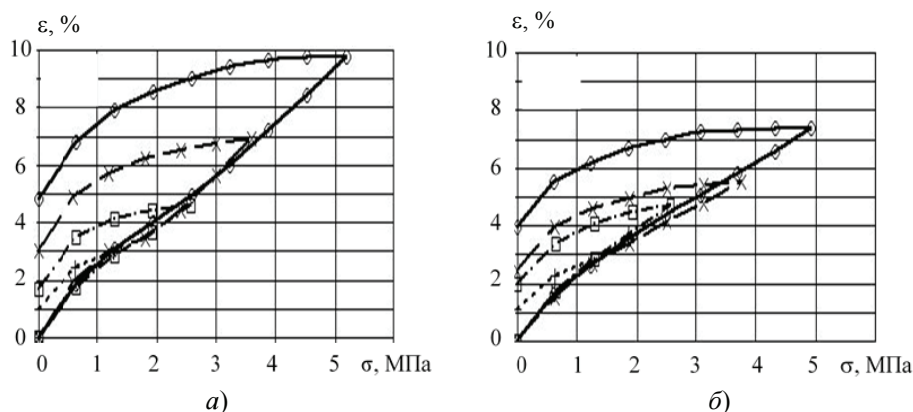


Рис. 1. Влияние ступенчатого нагружения на деформационные процессы при сжатии для древесно-стружечных плит плотностью 700 (а) и 800 (б) кг/м³

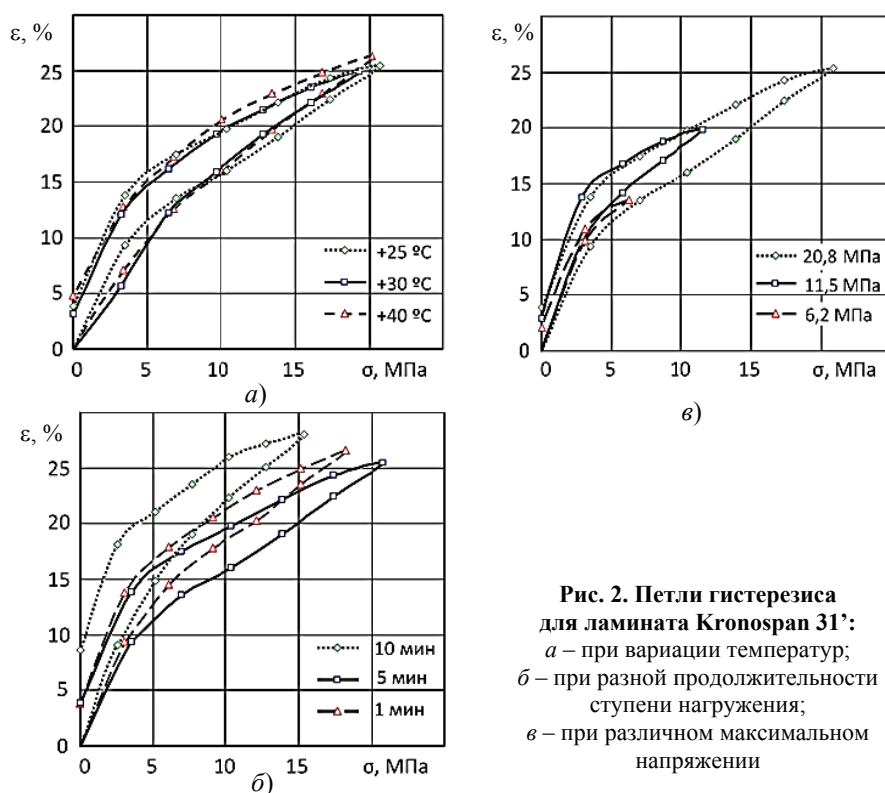


Рис. 2. Петли гистерезиса для ламината Kronospan 31':
а – при вариации температур;
б – при разной продолжительности ступени нагружения;
в – при различном максимальном напряжении

Зависимости, полученные при ступенчатом нагружении, напоминают «петли гистерезиса», то есть при одних и тех же значениях напряжения σ деформация при нагружении существенно меньше, чем при разгрузке (см. рис. 1). Величина упругой (обратимой) деформации зависит от нескольких параметров: во-первых, от полной деформации, во-вторых, от плотности материала и, в-третьих, от температуры. Величина деформации составила порядка 2 – 5 % для ДСП плотностью 700 кг/м³ с дисперсной стружкой. Для древесно-стружечных плит с мелкой стружкой плотностью 800 кг/м³ она ниже и достигает 1,7 – 3,4 %. Для ламината

величина деформации попадает в те же пределы – 4 – 5 %. Величина остаточной деформации, которая остается после разгрузки образца зависит от уровня полной деформации. Однако если полная деформация древесно-стружечных плит составляет 1,2 %, то после снятия нагрузки она полностью исчезает.

Для древесно-стружечных плит и ламината характерна небольшая площадь «петли гистерезиса», то есть многократное нагружение не вызывает больших механических потерь. Влияние скорости нагружения и температуры на величину остаточной деформации представлено в табл. 1.

Для древесно-стружечных плит плотностью 800 кг/м^3 при повышении температуры такие параметры, как площадь «петли гистерезиса», максимальная и остаточная деформации, увеличиваются незначительно, а квазиупругая деформация даже остается постоянной (см. табл. 1). Однако с уменьшением плотности древесно-стружечных плит все три параметра увеличиваются по линейным законам. Неизменной опять же остается величина квазиупругой деформации, которая подтверждает пропорциональность величин остаточной и максимальной деформаций. На величину квазиупругой деформации оказывает существенное влияние только величина ступеней при нагружении материала.

Повышенная температура не оказывает практически никакого влияния на деформационных характеристиках ламината, а древесно-стружечные плиты, наоборот, чувствительны к действию данного фактора и для них характерно усиление деформационных процессов [3, 5].

Еще большее влияние оказывает ступенчатое нагружение. С увеличением ступеней при сохранении длительности нагружения происходит заметное увеличение остаточной деформации и площади «петли гистерезиса» для ламината и всех деформационных характеристик ДСП плотностью 800 кг/м^3 .

Длительность нагружения значительно сказывается на свойствах ДСП с дисперсной стружкой и ламината.

Все процессы, возникающие в материалах, взаимосвязаны с процессами релаксации, то есть способностью материала залечивать дефекты [2]. С уменьшением скорости деформирования вероятность возникновения релаксационных процессов растет. При этом восстанавливаются не только форма образца, но и их первоначальные механические характеристики. С повышением температуры движение частиц внутри материала увеличивается, следовательно, дефекты будут залечиваться быстрее [1].

Проанализируем влияние скорости и уровня нагружения (так как этот параметр сильно влияет на усталость материала) на прочность древесных композитов, подвергающихся действию циклической нагрузки, а также влияние времени отдыха на интенсивность накопления усталости. При циклических нагружениях процесс нагружения-разгрузки происходит многократно, что усложняет работу материала, зачастую приводя к возникновению дополнительных дефектов за счет усталости. Испытания проводились на двух древесных композитах с разной структурой – фанере и ДСП (рис. 3). Отмечено, что ДСП более чувствительна к изменению скорости нагружения.

Итоговая прочность ДСП, которая указана в долях от начальной¹ более резко нарастает с увеличением скорости нагружения. Однако в диапазоне 0,4...0,7 кг/с материал не реагирует на изменение данного фактора, а затем, в интервале 0,7...1,0 кг/с, происходит скачкообразное увеличение его прочности [6]. У фанеры же увеличение прочности происходит равномерно во всем диапазоне скорости нагружения

¹ Начальная прочность – разрушающая прочность, полученная однократным нагружением образцов, не подвергавшихся каким-либо воздействиям.

Таблица 1

**Влияние различных факторов
на деформационно-силовые параметры древесных композитов**

Факторы	Деформационно-прочностные характеристики					
	Ско- рость нагру- жения, кН/мин	Макси- мальное напря- жение, МПа	Макси- мальная деформа- ция, %	Остаточ- ная де- форма- ция, %	Квазиуп- ругая деформа- ция, %	Площадь петли гистерезиса, (%·МПа)
<i>ДСП плотностью 700 кг/м³</i>						
Температура, °С	18	6	5,19	10,47	5,46	5,01
	44	6	5,19	11,69	6,31	5,38
	58	6	5,19	12,62	7,71	4,91
Величина ступен- чатой нагрузки, кг	1	1	5,18	9,53	5,03	4,5
	3	3	5,18	9,78	4,85	4,93
	6	6	5,18	10,47	5,46	5,01
Длительность ступе- ней нагружения, мин	10	3	5,19	9,78	4,85	4,93
	5	6	5,19	9,71	4,5	5,21
	1	30	5,19	7,55	2,8	4,75
<i>ДСП плотностью 800 кг/м³</i>						
Температура, °С	18	6	5,1	9,7	5,5	4,2
	44	6	5,1	10,1	6,2	3,9
	58	6	5,1	10,5	6,2	4,3
Величина ступен- чатой нагрузки, кг	1	1	5,2	8,9	4,1	4,8
	3	3	5,2	9,65	4,2	5,45
	6	6	5,2	10,9	4,9	6
Длительность ступе- ней нагружения, мин	10	3	5,1	10,1	5,5	4,6
	5	6	5,1	9,6	5,4	4,2
	1	30	5,1	9,1	4,9	4,2
<i>Ламинат Kronospan 31' [5]</i>						
Температура при испытании, °С	25	0,006	20,81	25,4	3,87	21,53
	30	0,006	19,29	24,91	3,08	23,21
	40	0,006	20,22	26,29	4,73	21,56
Длительность ступе- ней нагружения (по 0,311 кН), мин	10	0,003	15,33	28,03	8,570	19,46
	5	0,006	20,82	25,40	3,870	21,53
	1	0,030	18,82	26,54	3,78	22,76
Максимальное напряжение, МПа	20,8	0,06	–	25,40	3,50	21,90
	11,5	0,06	–	20,00	2,50	17,50
	6,2	0,06	–	13,00	2,00	11,00

(0,4...1,0 кг/с). Полученные различия в поведении материалов можно объяснить их строением. Из-за своей слоистой структуры фанера имеет более стабильное поведение, чем ДСП. Во всем исследуемом интервале скорости нагружения дефекты тормозятся уже на начальной стадии их развития о границы слоя, в кото-
ром они появились. Также на прочностные закономерности материала оказывает

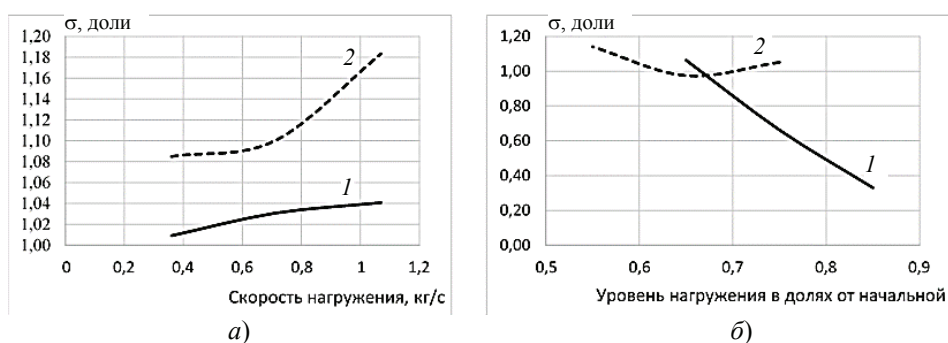


Рис. 3. Влияние на прочность древесных композитов скорости нагружения (а) и величины нагружения в цикле (б):
1 – фанера, 2 – ДСП

свое влияние и его жесткость. На графике видно, что после определенной скорости нагружения (0,7 кг/с) ДСП уже исчерпывает свои эластичные свойства. Эластические деформации не успевают проявляться, и в материале уменьшается ползучесть. Вследствие этого материал начинает работать более упруго и увеличивает свои прочностные свойства.

При интенсивности нагрузки для материалов характерно следующее поведение. Фанера сильнее реагирует на изменение величины нагрузки, при ее уровне 65 – 85 % от начальной видно значительное снижение прочности (на 50 %); для ДСП при уровне нагрузки 55 – 75 % от первоначальной теряется только 10 % прочности. Полученные зависимости можно объяснить различиями материалов по их однородности строения. Древесно-стружечная плита в целом более однородный материал, у фанеры же имеется ориентация в продольно-поперечном направлении за счет ее слоистого строения. В результате механизмы разрушения в ДСП запускаются с малого уровня нагружения и не меняют в последующем своего характера.

Фанера же в силу своей неоднородности и слоистости имеет несколько ступеней в процессе разрушения. Самым слабым участком при испытаниях на изгиб являются слои фанеры, волокна в которых направлены перпендикулярно образцу [7]. В них появляются первые микротрещины, которые начинают свой рост. При испытаниях неоднократно наблюдалось, как данные слои шпона разделялись на отдельные части и выключались из работы, причем образец не разрушался, а продолжал работать как многослойная балка на податливых связях. Процесс происходил последовательно, начиная с нижнего. В результате увеличивалась деформативность образца и слои со шпоном, ориентированным вдоль, все больше пытались сместиться друг относительно друга. Касательные напряжения в клеевом слое росли, и в определенный момент начиналось разрушение по клеевому шву. В этот момент рабочими оставались только слои с продольными волокнами. Постепенно и они начинали разрушаться. После разрушения первого снизу слоя нагрузка на второй возрастала и процесс образования трещины принимал лавинообразный характер.

Таким образом, при увеличении уровня нагружения снижаются барьеры на пути развивающихся трещин, которые превращались в магистральную трещину. На рисунке 4 показано сравнение интенсивности нарастания деформаций, в силу разной высоты образцов ДСП и фанеры. К пятому циклу остаточные деформации в ДСП при уровнях загрузки от начальной прочности в 75 и 55 % различаются примерно в 1,5 раза, тогда как в фанере при 85 и 65 % они различаются в 3,5 раза. Нарастание деформаций в ДСП происходит почти равномерно, тогда как для фанеры характерны перегибы. При этом по третий цикл включительно для обоих материалов накопление деформаций происходит одинаково.

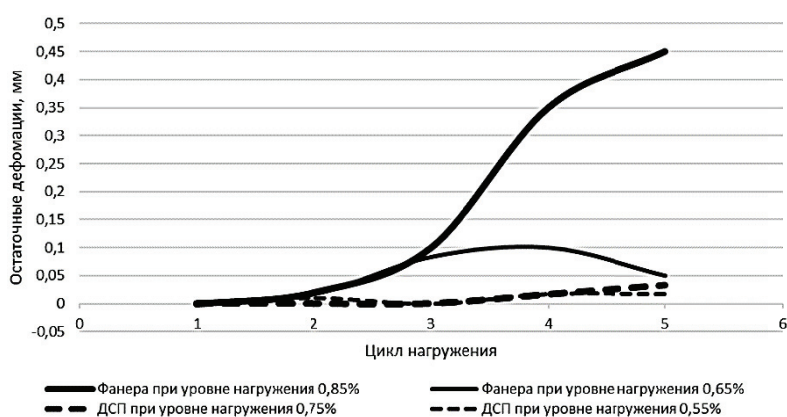


Рис. 4. Зависимости остаточных деформаций от цикла нагружения

Далее (после четвертого цикла) для фанеры процессы нарастания деформаций происходят нестабильно. Это можно объяснить тем, что уровень, при котором разрушаются слои с поперечным расположением волокон, пройден.

При многократных нагружениях начинает срабатывать усталость материала. В результате происходит образование большого количества дефектов, что в свою очередь приводит к запуску процессов разрушения и снижению прочности материала [8]. Но может произойти и обратный эффект, когда дефекты начинают заживаться в результате длительного отдыха. На рисунке 5 представлена взаимосвязь прочности материала и времени отдыха образцов от нагрузки, которая менялась от 2 мин до 1 сут. Продолжительность нагружения всегда составляла 30 мин. Количество циклов также варьировалось от 2 до 30 мин.

Во время проведения экспериментов с фанерой часть образцов, накопив усталость, разрушалась в произвольный момент времени даже под действием рабочей нагрузки. В итоге зависимость принимает вид, из которого следует, что с увеличением циклов испытаний прочность образцов не падает, а наоборот растет, (см. рис. 5) [6]. Так почему же наблюдается увеличение прочности? Это происходит потому, что до заключительного цикла эксперимента доживают заведомо более прочные образцы, а более слабые разрушились уже ранее. И чем больше проходит циклов, тем более прочные образцы остаются. Значит, явление увеличения прочности является искусственным, а выводы, сделанные на основании этих графиков, — ложными. Для выявления более реальной картины получена взаимосвязь количества циклов с количеством оставшихся образцов (см. рис. 5, б).

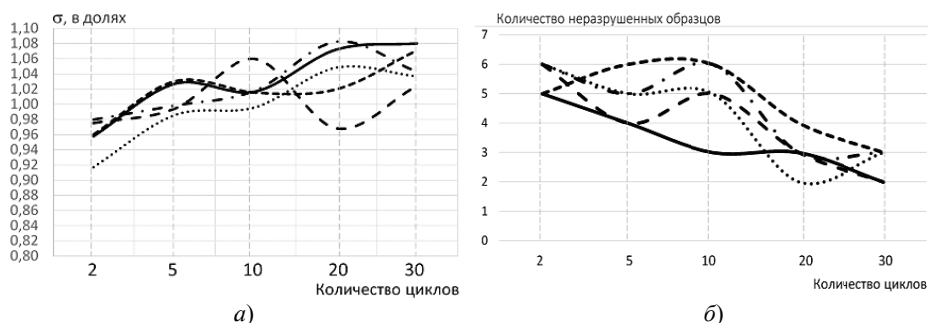


Рис. 5. Зависимости прочности (а) и количества образцов (б), доживших до заключительного цикла, от количества циклов для различных режимов нагружений:

— 2 мин, 15 мин, --- 30 мин, - · - · - 1 час, - - - - - 24 ч

Если же обратить внимание на образцы, не дожившие до заключительного цикла в каждом эксперименте, то можно увидеть четкое подтверждение, что усталостные процессы в них протекают. Когда образец разрушается под действием рабочей нагрузки, например на пятом цикле нагружения, то это значит, что его прочность снизилась из-за накопления дефектов. Чем больше проходит циклов нагружения, тем меньше остается образцов, доживших до заключительного цикла, что подтверждает накопление усталости в них. Кривая, построенная для режима с наименьшим отдыхом (2 мин), лежит ниже остальных (см. рис. 5, б). Следовательно, времени отдыха не хватило для залечивания дефектов и образцы разрушались быстрее. Кривая для режима с отдыхом 15 мин лежит заметно выше первоначальной кривой, различия между основными кривыми незначительны и находятся в пределах разброса полученных данных, из чего следует, что 15 мин отдыха часто бывает достаточно для залечивания основной массы дефектов.

Не учитывать образцы, разрушенные под действием рабочей нагрузки, нельзя. Тогда возник вопрос о том, как их учитывать. Многократно замечая самопроизвольное разрушение образцов под действием рабочей нагрузки, принято решение провести долговременные испытания образцов в заданных режимах. Образцы нагружались рабочей нагрузкой в течение некоторого количества циклов (одинакового для каждого режима), но в ходе испытаний для каждого образца фиксировалось его время жизни под нагрузкой. По полученным данным построен график зависимости, показывающий, что после многократного действия нагрузки величиной 75 % от разрушающего напряжения, чередующейся с отдыхом в течение 24 ч, время жизни образцов фанеры также увеличивается в 2,2 раза (рис. 6).

Такой эффект говорит о том, что при отдыхе происходит залечивание дефектов. Большинство восстанавливаемых дефектов (76 %) залечивается в течение первых 30 мин времени отдыха, и к 24 ч практически все дефекты имеют возможность устраниться. Однако с течением времени интенсивность восстановления связей замедляется и увеличение продолжительности отдыха до недели положительных результатов не дает: прочность и количество образцов, доживших до конца пятого циклов с отдыхом 1 неделя были практически равны прочности количеству образцов с отдыхом 1 сутки [6].

Зависимость долговечности для ДСП имеет аналогичный вид, но уже после 30 мин участок кривой фактически горизонтален. Это говорит о том, что спустя 30 мин процессы залечивания дефектов в материале во время отдыха практически останавливаются. При этом до 30 мин интенсивность восстановления прочности в ДСП выше, чем в фанере (89 % залеченных дефектов против 76 %).

Выявленные различия связаны со структурой материалов. Структурные единицы в ДСП, если рассматривать строение материала на уровне композита, более

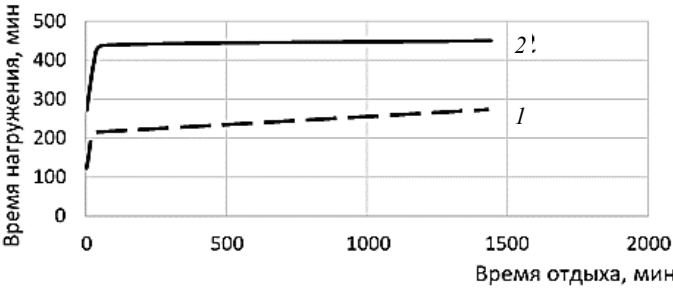


Рис. 6. Зависимости продолжительности жизни образцов под нагрузкой от времени отдыха:
1 – фанера; 2 – ДСП

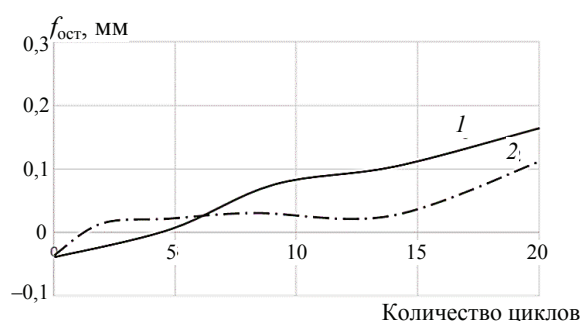


Рис. 7. Зависимости остаточного прогиба от количества циклов для различных режимов испытаний:
1, 2 – соответственно 2 и 60 мин отдыха

мелкие, чем в фанере. Развитие дефектов, в частности, рост трещин, в нем протекает быстрее, так как трещине проще обогнуть небольшую стружку, чем найти дефектный участок в гораздо большем по размерам и более однородном по структуре слое шпона (что снижает вероятность появления мест концентрации напряжений). Однако, по причине все той же мелкодисперсности ДСП, процессы регенерации в нем более вероятны, что способствует более быстрому восстановлению разорванных связей.

Дополнительно в ходе длительных испытаний проводилось измерение остаточного прогиба образцов после снятия нагрузки (рис. 7). Отчеты по приборам снимались во время отдыха непосредственно перед следующим нагружением. Выявленная динамика набора образцами остаточного прогиба также подтверждает ранее полученные зависимости. Так, при отдыхе в 2 мин прогиб в образцах начинает накапливаться уже после пятого цикла. Если увеличить отдых до 60 мин, то видно, как прогиб образцов немного увеличивается за первые два цикла, а затем его величина стабилизируется и начинает резко расти только после 14 цикла.

Итак, усталостные процессы в древесных материалах существуют, и они начинают сказываться уже после пятого циклов. В результате прочность образцов снижается, а деформации растут.

В процессе эксплуатации древесные композиты находятся часто под действием не постоянных, а переменных нагрузок. К таким конструкциям можно отнести стеновые панели, полы. Поэтому возникла необходимость в изучении влияния переменности нагружения на долговечность материала.

С этой целью на примере двух материалов (древесно-стружечной плиты и ламината) проведены длительные испытания. Уровень изменения напряжений и продолжительность их действия принималась в соответствии с изменением ветровой нагрузки (северное направление ветра) для Тамбова [9]. Первый базовый уровень напряжений был принят равным 82 % от разрушающего для ДСП и 92 % для ламината (на диаграмме соответствует уровню 1, рис. 8). Полученные результаты длительных испытаний представлены на рис. 9, из которого видно, что при переменных нагрузках зависимости имеют линейный характер, причем наклон прямой меняется. Для ламината прямые долговечности при переменном и постоянном нагружении сходятся в точке, соответствующей напряжению 30,25 МПа и долговечности 10,5 минут. При более высоких напряжениях переменность нагружения не будет сказываться на долговечности композита, так как выбранный цикл составляет 20 мин.

Древесно-стружечные плиты являются более чувствительными к переменности нагружения. Для данного материала уровень снижения долговечности превышает два порядка, следовательно, его дефектность выше. Несмотря на то что

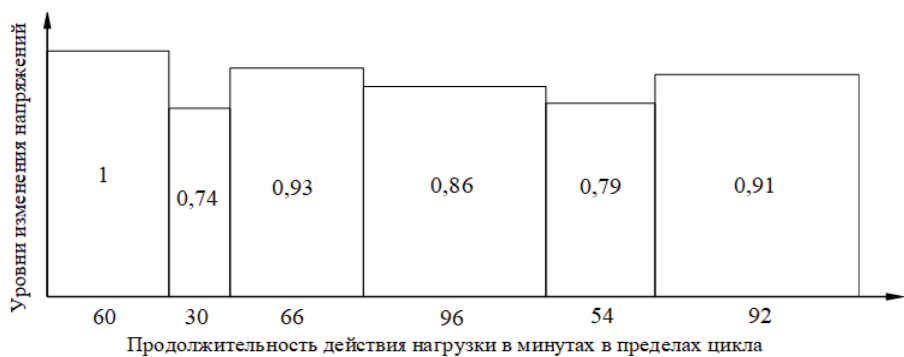


Рис. 8. Диаграмма изменения напряжений

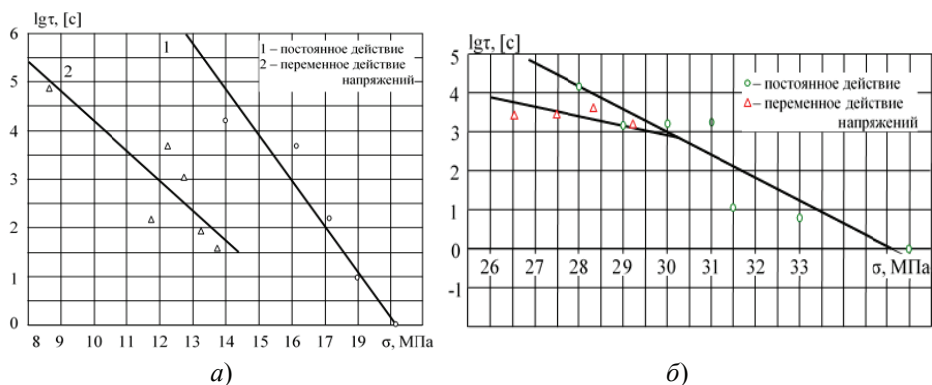


Рис. 9. Зависимости долговечности от напряжений (при поперечном изгибе) при температуре +20 °С:
а – ДСП; б – ламинат

Таблица 2
Значения физических и эмпирических констант при поперечном изгибе, входящих в уравнение (1)

Материал	Плотность, кг/м ³ / марка ламината	Уровень температуры, °С	Физические и эмпирические константы			
			$\tau_m (\tau_m^*), \text{с}$	$T_m (T_m^*), \text{К}$	$U_0 (U_0^*), \text{кДж/моль}$	$\gamma (\gamma^*), \text{кДж/(МПа} \cdot \text{моль)}$
ДСП	650	—	10^{-3}	571	194	12,8
			$10^{-3,2}$	465	244	16,7
	700		$10^{-2,9}$	540	213	11,3
	850		10^{-2}	454	255	21,6
Ламинат	Kronospan31'	< +60	$10^{-1,35}$	651	232	6,23
		> +60	$10^{-2,7}$	392	723	19,23
	Kronostar 31'	< +40	10^{-2}	552	299	7,17
		> +40	10^{-2}	377	743	17,50
	Tarkett 32'	—	$10^{-4,38}$	451	404	6,90

оба материала имеют волокнистое строение, при производстве ламината применяется более мелкая стружка высокого качества, что придает ему большую стабильность.

Учесть действие данного параметра, то есть переменность нагружения, можно с помощью поправок к уравнению долговечности (1) [10], которое было получено для постоянных напряжений. Величины всех констант, входящих в данное уравнение, представлены в табл. 2. Поправки для перехода от постоянных нагрузок к переменным, учитывающие действие переменных напряжений, следующие: твердое ДСП – $\Delta = 0,375 \sigma - 8,3$; ламинат Kronospan – $\Delta = 0,38\sigma - 11,44$ (для ламината поправка справедлива при напряжениях менее 30 МПа, а для ДСП – менее 14 МПа)

Заключение

Для залечивания дефектов древесным композитам часто бывает достаточно 15 мин отдыха для фанеры и 30 мин – для ДСП. При этом интенсивность восстановления прочности в ДСП выше, чем в фанере (89 % залеченных дефектов против 76 %). Древесные композиты также подвержены процессам усталости, которые начинают сказываться уже после 5 циклов нагружения. Для снижения их влияния требуется увеличение продолжительности отдыха при многократно действующих нагрузках. Так, если увеличить продолжительность отдыха до 24 ч, то время жизни образцов фанеры возрастет в 2,2 раза.

Полученные данные позволяют прогнозировать долговечность не только в широком интервале постоянных нагрузок и температур, но и при переменном их действии.

Список литературы

1. Аскадский, А. А. Деформация полимеров / А. А. Аскадский. – Москва : Химия, 1973. – 448 с.
2. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров : учеб. пособие для хим. и хим.-технол. специальностей вузов / А. А. Тагер. – 2-е изд. – Москва : Химия, 1968. – 536 с.
3. Киселева, О. А. Прогнозирование работоспособности древесноволокнистых и древесностружечных композитов в строительных изделиях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Киселева Олеся Анатольевна. – Тамбов, 2003. – 205 с.
4. Yartsev, V. P. Prediction of the Building Materials Performance in Products and Structures / V. P. Yartsev, O. A. Kiseleva // Advanced Materials & Technologies. – 2019. – № 4(16). – P. 35–52. doi: 10.17277/amt.2019.04.pp.035-051
5. Кольцов, П. М. Прогнозирование долговечности ламинированных древесноволокнистых композитов строительного назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Кольцов Павел Михайлович. – Тамбов, 2010. – 178 с.
6. Ходаев, А. А. Влияние режима циклических нагружений на прочность древесных композитов / А. А. Ходаев, О. А. Киселева // Перспективы развития науки и образования : сборник научных трудов Межд. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. – Часть 5. – С. 146–148.
7. Киселева, О. А. Прогнозирование прочности, деформативности и долговечности строительной фанеры / О. А. Киселева, В. П. Ярцев, А. В. Сузюмов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 976–982.
8. Романов, А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении : монография / А. Н. Романов. – Москва : Наука, 1988. – 280 с.

9. СНиП 2.01.01–82. Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. – Москва : Стройиздат, 1983. – 136 с.

10. Kiseleva, O. A. Influence of Fluctuations in Temperature on Longevity of Chip Boards / O.A. Kiseleva, A.A. Mironov, V.P. Yartsev // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 1. – С. 91–94.

Physical and Technical Foundations of the Performance of Wood Composites under Cyclic and Variable Loads

© O. A. Kiseleva¹, V. P. Yartsev¹

¹ *Department of Building and Structure Design, kiseleva_oa@rambler.ru;
TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: deformation; durability; wood composites; variable loading; strength; fatigue; cyclic loading.

Abstract: Using particleboard and laminate as examples, the relationship between deformation processes and strength is described. The influence of various parameters (temperature, loading rate, and level) on these processes is considered. The effect of cyclic loading on the strength of particleboard and plywood is studied. The rest period between loading cycles was selected to extend the lifespan of materials. Long-term testing of wood composites under cyclic and variable load conditions was examined.

References

1. Askadsky A.A. *Deformatsiya polimerov* [Polymer deformation], Moscow: Khimiya, 1973, 448 p. (In Russ.)
2. Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physico-chemistry of polymers], Moscow: Khimiya, 1968, 540 p. (In Russ.)
3. Kiseleva O.A. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Tambov, 2003, 205 p. (In Russ.)
4. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Prediction of the Building Materials Performance in Products and Structures, *Advanced Materials & Technologies*, 2019, no. 4(16), pp. 35-52. doi: 10.17277/amt.2019.04.pp.035-051
5. Koltsov P.M. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Tambov, 2010, 178 p. (In Russ.)
6. Khodaev A.A., Kiseleva O.A. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhd. nauchno-prakticheskoy konfrentsii Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya* [Prospects for the development of science and education: Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference], Tambov, 2013, Part 5, pp. 146-148. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kiseleva O.A., Yartsev V.P., Suzyumov A.V. [Forecasting the strength, deformability, and durability of construction plywood], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 976-982. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Romanov A.N. *Razrushenie pri malociklovom nagruzhenii* [Destruction under low-cycle loading: a monograph], Moscow Nauka, 1988, 280 p. (In Russ.)
9. СНиП 2.01.01–82. *Stroitel'naya klimatologiya i geofizika* [Construction climatology and geophysics], Moscow: Stroyizdat, 1983, 136 p. (In Russ.)

10. Kiseleva O.A., Mironov A.A., Yartsev V.P. Influence of fluctuations in temperature on longevity of chip boards, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 1, pp. 91-94.

Physikalische und technische Grundlagen des Verhaltens der Holzverbundwerkstoffe unter zyklischer und variabler Belastung

Zusammenfassung: Anhand von Spanplatten und Laminaten ist der Zusammenhang zwischen Verformungsprozessen und Festigkeit erörtert. Der Einfluss verschiedener Parameter (Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit und -niveau) auf diese Prozesse ist betrachtet. Es ist die Wirkung zyklischer Belastung auf die Festigkeit von Spanplatten und Sperrholz untersucht. Die Ruhezeit zwischen den Belastungszyklen ist so gewählt, dass die Lebensdauer der Materialien verlängert wird. Es sind Langzeitversuche an Holzverbundwerkstoffen unter zyklischer und variabler Belastung betrachtet.

Fondements physiques et techniques de la performance des composites de bois dans les cycles et des charges variables

Résumé: A l'exemple des panneaux de particules et du stratifié est décrite la relation entre les processus de déformation et la résistance. Est prise en compte l'influence de différents paramètres (température, vitesse et niveau de charge) sur les données du processus. Est étudié l'effet du chargement cyclique sur la résistance des panneaux de particules et du contreplaqué. Est choisie la durée de repos entre les cycles de charge pour prolonger la durée de vie des matériaux. Sont examinés les essais à long terme des composites de bois dans le mode d'essais cycliques et de charges variables.

Авторы: *Киселева Олеся Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений», *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ С СИТАЛЛОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИБОРОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© А. П. Королев¹✉, Д. М. Мордасов¹

¹ Кафедра «Материалы и технология»,
korolevanpal@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: алюминиевый катод; вакуумное напыление; диффузионная сварка; медный анод; оксидный эмиссионный слой; ситалл.

Аннотация: Показаны преимущества диффузионного сварного соединения алюминиевого катода и медного анода с ситалловым корпусом лазерного гироскопа по сравнению с пайкой легкоплавким припоем индия. Приведены разработанная технология диффузионной сварки и экспериментальные результаты по определению качества и надежности соединения. Представлено исследование физико-химических процессов, происходящих при осуществлении диффузионной сварки.

Введение

Газоразрядные кольцевые лазеры для систем инерциальной навигации летательных аппаратов находят широкое применение в современных приборах. Существует ряд технологических проблем при изготовлении гироскопов [1 – 4], которые необходимо решать для повышения свойств функциональных компонентов газоразрядных кольцевых лазеров, от которых зависит долговечность и точность работы всего гироскопа.

Точность, временной ресурс и надежность лазерного гироскопа можно увеличить, расширив тем самым сферу его использования, например в космической технике. Эти характеристики зависят и от надежности и герметичности крепления катода и анода к ситалловому корпусу гироскопа [1].

Цель работы – исследовать применение диффузионной сварки меди и алюминия с ситаллом с промежуточным слоем из алюминия.

Методика проведения исследований

Наиболее распространенной технологией крепления катода и анода к ситалловому блоку является пайка с помощью легкоплавкого припоя индия с температурой плавления 145 °С. Это соединение обеспечивает необходимую герметичность и прочность. Однако серьезным недостатком индиевой пайки является то, что в экстремальных условиях эксплуатации (авиация, космос) возможен нагрев до температур, близких к температуре плавления индия. Возникновение такой ситуации неизбежно приведет к отказу в работе лазерного гироскопа. В связи с этим решено на основании проведенных исследований разработать технологию диффузионной сварки катодов и анодов к ситалловому блоку гелий-неонового лазерного гироскопа. При технологических операциях диффузионной сварки

в зоне сварного соединения происходят микро- и субмикроструктурные изменения [2, 4, 5], который влияют на качество изделия. Чтобы избежать этих нежелательных явлений сварку катода и анода к ситаллу осуществляли через промежуточный слой. Выбор оптимального промежуточного слоя, обеспечивающего получение высококачественного соединения разнородных материалов, диктуется следующими требованиями к его свойствам: хорошей свариваемостью при нагреве в вакуумной печи; благоприятными теплофизическими характеристиками для осуществления твердофазного соединения; соответствием по термическим коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) и модулю упругости между основными материалами. Наиболее распространенными промежуточными материалами для соединения неметаллов являются алюминий, медь, ковар 29НК, ниобий и титан, применяемые в виде фольги толщиной не более 0,2 мм. При большей ее толщине металл выступает в роли самостоятельного элемента конструкции. Для формирования сварного соединения неметалла (ситалла) с металлом (медным анодом) через промежуточный алюминиевый слой необходимо исследовать физико-химические процессы, происходящие на границе медь – алюминий [2]. Исследовав эти процессы, можно управлять формированием сварного соединения для получения требуемого качества.

При сварке меди с алюминием происходит взаимодиффузия меди в алюминий и алюминия в медь. В системе медь – алюминий могут образовываться различные фазы, неоднозначно влияющие на механические характеристики приграничных слоев медь – алюминий и алюминий – медь. Практический интерес представляют твердый раствор алюминия в решетке меди и твердый раствор меди в решетке алюминия. Твердый раствор на основе Cu имеет широкую область гомогенности (рис. 1): при температурах ниже 565 °C (в том числе ниже температуры сварки 300 °C) в меди может раствориться до ~ 8 масс. % алюминия.

Растворимость меди в алюминии значительно меньше (рис. 2): при эвтектической температуре (548 °C) составляет ~ 5,7 масс. %, с понижением температуры растворимость уменьшается до ~ 0,5 масс. % при температурах ниже 300 °C (температура диффузионной сварки).

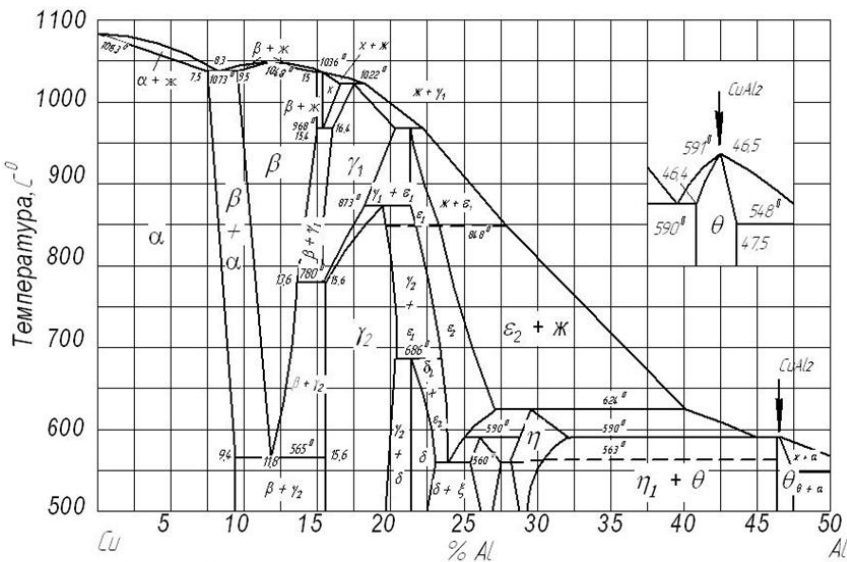


Рис. 1. Диаграмма системы медь – алюминий

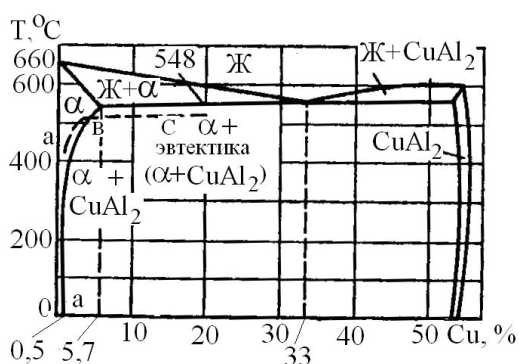


Рис. 2. Диаграмма системы алюминий – медь

Переменная растворимость меди в решетке алюминия приводит к появлению фазы CuAl_2 – твердых и хрупких выделений по границам зерен (Al) – твердого раствора. В связи с этим при диффузионной сварке алюминия и меди диффузионный слой должен состоять из пластичного твердого раствора алюминия в меди с гранецентрированной кубической решеткой и пластичного твердого раствора меди в алюминии с такой же решеткой. Необходимо, чтобы оба твердых раствора имели близкие параметры решеток и механические характеристики – твердость, прочность, пластичность и ТКЛР. Такие параметры позволят избежать механических напряжений и, как следствие, разрушений на границах слоев. Однако в твердом растворе меди в алюминии при охлаждении возможно выделение хрупкой фазы CuAl_2 , что ухудшает пластичность диффузионного слоя со стороны алюминия. Образование остальных промежуточных фаз при диффузионной сварке невозможно, так как при диффузии растворимость при низких температурах (до 300 °C) ограничена из-за малой подвижности атомов.

Экспериментально доказано, что для борьбы с выделением хрупкой фазы CuAl_2 охлаждение следует проводить с малой скоростью (до 95 °C/мин). Диффузионная сварка осуществлялась в вакууме [1], поэтому охлаждение проводили натеканием в вакуумную камеру аргона (продувкой в аргоне). Через двое суток в результате старения все равно выделяются фазы-упрочнители CuAl_2 , но без быстрого охлаждения перед старением они выделяются в мелкодисперсном виде, образуя зоны Гинье–Престона (микрообласти, насыщенные атомами растворенного компонента). Эти зоны, повышая прочность диффузионного слоя не охрупчивают его. При сварке катода с ситалловым корпусом, казалось бы, не требуется промежуточного алюминиевого слоя, так как катод выполнен из алюминия. Но проведенные исследования высокочистого алюминия А5N показали, что процессы самодиффузии и связанной с ней ползучести под нагрузкой 1200 Н начинаются в алюминии уже ниже 0,3 температуры плавления $T_{\text{пл}}$ (ниже 198 °C).

В первых экспериментах диффузионную сварку катодов проводили напрямую контактом металлической детали с ситаллом. Контактные поверхности ситалла и алюминия обезжиривали спиртом, металл дополнительно травили в 5%-м водном растворе HF для создания микрорельефа. Уже двухчасовая выдержка при температуре 350 °C под нагрузкой 1200 Н приводила к оптическому контакту соединяемых деталей. Контроль герметичности конструкции успешно выдерживала. Однако наличие большой макропластической деформации по фланцу алюминиевой детали приводило к заметному росту площади контакта, на которой формировались заметные термические напряжения, связанные с разни-

цей ТКЛР алюминия и ситалла. Они вызывали разрушение по поверхности контакта в условиях ударных и вибрационных испытаний изделия. Разрушению способствовала существенная неоднородность макродеформации фланца алюминиевого катода: сочетание области почти трехмерного сжатия под нагружающим пуансоном и зоны свободного течения расширяющегося металла. Для локализации пластической деформации в области сварочного контакта алюминиевый катод – ситалл использовалась при сварке прокладка из алюминия А5N толщиной 20...100 мкм. Фольга получена из отходов заготовительного производства прокаткой. Перед сваркой прокладку и алюминиевый катод протравили в 5%-м водном растворе HF. Контактную поверхность ситаллового блока травили в 20%-м водном растворе плавиковой кислоты. Благодаря выбранной схеме в процессе сварки происходила микропластическая деформация промежуточной фольги в неровности микрорельефа катода и ситаллового блока. Формирующаяся развитая поверхность контакта деталей сглаживала градиент ТКЛР, что увеличило сопротивление образованию трещин в условиях динамического удара и виброиспытаний. Для осуществления диффузионной сварки изготовлено рычажное приспособление для обеспечения разного усилия при нагружении и выбора наиболее оптимального.

У катода лазера эмиссионным слоем является поверхностный оксид. Поэтому перед сваркой катоды подвергались окислению для получения оксидного эмиссионного слоя [3, 6, 7]. Затем фланцевый торец обрабатывался с целью удаления этого слоя, так как данная поверхность не участвует в эмиссии и оксид мешает диффузионному соединению с ситаллом. Подготовленные катоды с алюминиевыми прокладками помещались в нагружающее устройство и нагревались в вакуумной печи при температурах 100, 200, 300 и 350 °C в течение 30 мин, 1 ч, 3 ч и 5 ч. Затем полученные диффузионной сваркой соединения проходили регламентные испытания на соответствие следующим нормам: 1) допустимый нагрев при сварке должен быть не выше 300...350 °C; 2) величина остаточных напряжений не должна превышать 6 кг/см²; 3) соединение должно быть герметично при контроле методом гелиевого течеискателя; устойчивым к воздействию рабочих температур –60...+85 °C и термоциклированию в этом же диапазоне температур; 4) сварка должна выдерживать синусоидальные вибрации при амплитуде ускорения 40 м/с²; амплитудные перемещения 2,5 мм; диапазон частоты 5...2000 Гц; акустический шум в диапазоне частот 100...10000 Гц и уровень звукового давления 130 Дб; 5) конструкция должна выдерживать механические удары многократного действия – 10 000 ударов с пиковым ускорением 78 м/с² и длительностью действия 20 мс; одиночные удары с ускорением не менее 400 м/с².

Для получения более однородного, следовательно, более надежного и герметичного переходного слоя между алюминиевым катодом и ситалловым блоком, было решено в качестве прокладки использовать напыленный в вакууме на ситалл слой алюминия. Новая технология диффузионной сварки с промежуточным слоем включает в себя следующие основные операции:

- визуальный контроль поверхностей фланца катода и ситаллового блока с помощью оптического микроскопа отражательного типа и промывка деионизованной водой;
- травление поверхности фланца в 5%-м растворе HF для создания микрорельефа (развитой поверхности);
- травление поверхности ситаллового блока в 20%-м растворе HF для создания микрорельефа (развитой поверхности);
- напыление тонкого слоя хрома на поверхность ситаллового блока для улучшения адгезии;

- напыление на хром пленки алюминия;
- помещение блока с катодом в нагружающее устройство под нагрузкой 550 Н на всю площадь поверхности фланца;
- выдержка блока с катодом в нагружающем устройстве в вакуумной печи при температуре 300 °С в течение 60 мин;
- контроль качества шва на герметичность и на прочность при растяжении.

Технология получения неразъемного соединения алюминиевого катода к ситалловому блоку методом диффузионной сварки позволяет создавать герметичное соединение [5] алюминиевого катода и ситаллового блока, выдерживающее большие температуры и механические нагрузки по сравнению с соединениями, полученными традиционной технологией пайки легкоплавким припоем индия. Сварное соединение с напыленным промежуточным слоем успешно прошло те же испытания, что и соединение с фольгой. Испытания сварного соединения на прочность показали, что при отрыве катода от ситаллового блока сварной слой не разрушился, а оторвался вместе с катодом – разрушился сам ситалл (рис. 3). Таким образом, оказалось, что сварное соединение прочнее самого ситалла.

Проведенные регламентные испытания сварных соединений показали, что наиболее оптимальные свойства диффузионной сварки получаются при толщине промежуточного слоя алюминия 50 мкм, давлении 3 кг/мм², температуре 300 °С и времени выдержки 3 ч. По такой же технологии крепился анод к ситалловому блоку. Получены экспериментальные образцы крепления диффузионной сваркой анода и катода к ситаллу (рис. 4).

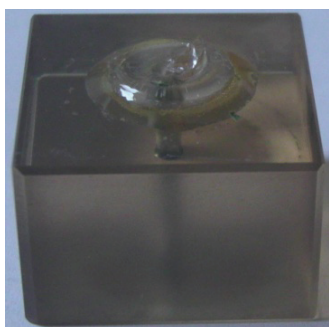


Рис. 3. Место отрыва катода от ситаллового блока

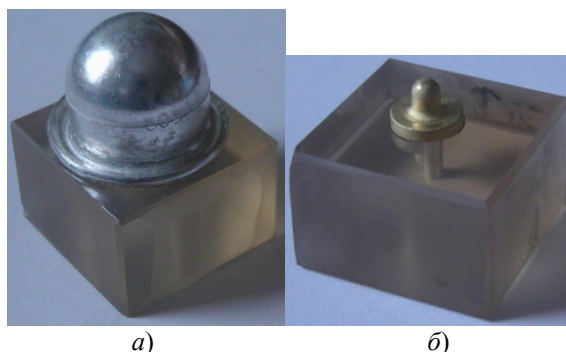


Рис. 4. Крепление к ситаллу СО-115М (астроситаллу) диффузионной сваркой алюминиевого катода 285-3 (а) и медного анода (б)

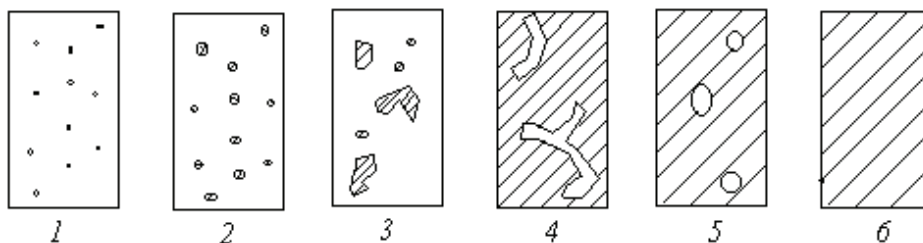


Рис. 5. Формирование сплошной пленки при вакуумном напылении:

- 1, 2 – зарождение и рост зародышей;
- 3 – коалесценция зародышей;
- 4 – образование лабиринтной структуры;
- 5 – возникновение отдельных несплошностей;
- 6 – образование сплошной пленки

Результаты исследований

Для осуществления сварки через промежуточный алюминиевый слой проведено исследование модели формирования пленочной структуры. Физическая модель формирования структур с тонкой пленкой зависит от процесса перехода алюминия из газообразной фазы в твердую или жидкую (рис. 5).

Значительное влияние на рост и форму островков оказывает температура на поверхности напыления $T_{п.н.}$, в зависимости от которой конденсация может осуществляться по двум механизмам: пар – кристалл (**ПК**) и пар – жидкость – кристалл (**ПЖК**) (через жидкую фазу). Переход от одного механизма к другому осуществляется при критической температуре $T_{кр1} \approx 2/3 T_{пл}$, если конденсация происходит на нейтральную неориентирующую поверхность ситалла.

Форма островков в значительной степени определяется механизмом конденсации. В области $T_{п.н.} \geq T_{кр1}$, то есть при конденсации по механизму ПЖК, островки имеют сферическую форму или ограниченную форму с линейными размерами одного порядка в трех измерениях.

При более низких температурах конфигурация островков и промежутков зависит от возможности формоизменения островков. Значению $1/3 T_{пл}$ соответствует вторая критическая температура $T_{кр2}$, которая отвечает порогу рекристаллизации. В интервале температур $T_{кр2} < T_{п.н.} < T_{кр1}$, конденсация осуществляется по механизму ПК. При этом островки растут в виде плоских образований и, если степень заполнения невелика, могут иметь кристаллическую огранку. В этой области конденсат обычно текстурирован.

В области ниже $T_{кр2}$ пар переходит в жидкость. Определенную роль в образовании структуры в данном случае играет вращательная и поступательная миграция островков. Ниже $T_{кр2}$ плотность островков существенно увеличивается. Для ранних стадий роста пленки характерно образование лабиринтной структуры. В дальнейшем зародыш и капельки жидкой фазы неустойчивы и переходят в кристаллическое образование.

Заключение

В результате проделанной работы проведены теоретические и экспериментальные исследования физико-химических процессов, лежащих в основе нового диффузионного метода формирования неразъемного соединения катода и анода с ситалловым корпусом лазерного гироскопа. Для применения соединения алюминиевых катодов и медных анодов с ситалловым блоком в гироскопах космических систем осуществлены исследования диффузионных процессов с применением тонкопленочных технологий для создания промежуточного слоя (алюминия) при диффузионной сварке.

Проведенные исследования дают возможность использовать диффузионные соединения в более тяжелых условиях (в аэрокосмической технике) по сравнению с соединениями традиционной пайкой легкоплавкими металлами (с помощью легкоплавкого припоя индия). Разработанная новая технология диффузионной сварки металла с неметаллом, а именно алюминия и меди с ситаллом с промежуточным алюминиевым слоем, полученным в вакууме по тонкопленочным технологиям, позволяет получать соединения, обеспечивая их высокую надежность и прочность, герметичность, выдерживать более высокие температуры. Положительные результаты испытаний подтверждают целесообразность создания неразъемного соединения диффузионной сваркой.

Список литературы

1. Диффузионная сварка металлов к ситаллу / А. М. Минаев, Л. Н. Тялина, В. А. Пручкин, Д. М. Мордасов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 3(41). – С. 342–344.
2. Влияние технологических операций на структуру высокочистого алюминия при изготовлении холодных катодов / А. М. Минаев, Л. Н. Тялина, А. П. Королёв, Д. М. Мордасов, И. С. Филатов, В. А. Пручкин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 43С. – С. 28–32.
3. Брусенцов, Ю. А. Влияние времени окисления на толщину оксидного слоя алюминия / Ю. А. Брусенцов, И. С. Филатов, И. Г. Проценко // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 4(42). – С. 321–325.
4. Металлографические исследования алюминия А5N после технологических операций / А. П. Королёв, А. М. Минаев, Д. М. Мордасов, Л. Н. Тялина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – Т. 1, № 1(21). – С. 64–67.
5. Медведева, А. В. Классификация методов контроля пористости материалов / А. В. Медведева, Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 749–754.
6. Королёв, А. П. Определение толщины пленки Al_2O_3 на холодных катодах оптическим методом / А. П. Королёв, Д. М. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета, – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 683–687.
7. Королёв, А. П. Эллисометрический метод определения толщины пленки Al_2O_3 на алюминии / А. П. Королёв, Д. М. Мордасов // Математические методы в технике и технологиях : сборник трудов. – Саратов, 2012. – Т. 6. – С. 11–12.

Research and Application of Diffusion Welding of Copper and Aluminum with Sytall in the Production of Aircraft Instruments

© A. P. Korolev¹✉, D. M. Mordasov¹

¹ Department of Materials and Technology, korolevanpal@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russian Federation

Keywords: aluminum cathode; vacuum deposition; diffusion welding; copper anode; oxide emission layer; sitall.

Abstract: The advantages of a diffusion welded joint of an aluminum cathode and a copper anode with a sitall housing of a laser gyroscope compared to soldering with low-melting indium solder are shown. A developed diffusion welding technology and experimental results for determining the quality and reliability of the joint are presented. The study of the physicochemical processes occurring during diffusion welding is presented.

References

1. Minayev A.M., Tyalina L.N., Pruchkin V.A., Mordasov D.M. [Diffusion welding of metals to sitall], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 3(41), pp. 342–344. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Minayev A.M., Tyalina L.N., Korolev A.P., Mordasov D.M., Filatov I.S., Pruchkin V.A. [The influence of technological operations on the structure of high-purity aluminum in the manufacture of cold cathodes], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki*.

Universitet im. V.I. Vernadskogo [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 43S, pp. 28-32. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Brusentsov Yu.A., Filatov I.S., Protsenko I.G. [Effect of oxidation time on the thickness of the aluminum oxide layer], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 4(42), pp. 321-325. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Korolev A.P., Minayev A.M., Mordasov D.M., Tyalina L.N. [Metallographic studies of A5N aluminum after technological operations], *Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2015, vol. 1, no. 1(21), pp. 64-67. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Medvedeva A.V., Mordasov D.M., Mordasov M.M. [Classification of methods for monitoring the porosity of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 749-754. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Korolev A.P., Mordasov D.M. [Determination of Al_2O_3 film thickness on cold cathodes by an optical method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 683-687. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Korolev A.P., Mordasov D.M. [Ellipsometric method for determining the Al_2O_3 film thickness on aluminum], *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik trudov* [Mathematical methods in engineering and technology: collected papers], Saratov, 2012, vol. 6, pp. 11-12. (In Russ., abstract in Eng.)

Forschung und Anwendung des Diffusionsschweißens von Kupfer und Aluminium mit Polymerkeramik bei der Herstellung der Flugzeugapparate

Zusammenfassung: Es sind die Vorteile der Diffusionsschweißverbindung der Aluminiumkathode und der Kupferanode mit dem Siebkörper des Laser-Gyroskops im Vergleich zum Löten mit leichtschmelzendem Indium-Lot gezeigt. Die entwickelte Diffusionsschweißtechnologie sowie experimentelle Ergebnisse zur Bestimmung der Qualität und Zuverlässigkeit der Verbindung sind vorgestellt. Es ist die Untersuchung der während des Diffusionsschweißens ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse präsentiert.

Recherche et application du soudage par diffusion de cuivre et d'aluminium avec du sitall dans la fabrication d'instruments d'aéronefs

Résumé: Sont présentés les avantages de la soudure par diffusion de la cathode en aluminium et de l'anode en cuivre avec le corps en sitall du gyroscope laser par rapport à la soudure à l'indium. Est citée la technologie de soudage par diffusion développée et les résultats expérimentaux pour déterminer la qualité et la fiabilité de la connexion. Est présentée une étude des processus physico-chimiques qui se produisent lors de la mise en œuvre du soudage par diffusion.

Авторы: *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.