

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

**ВЕСТНИК  
Тамбовского  
государственного  
технического  
университета**

***TRANSACTIONS  
of the Tambov  
State  
Technical  
University***

***2025. Том 31. № 4.***

**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: gatarova.nc@mail.tstu.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Сафаров** Джавид, Dg.-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: gatarova.nc@mail.tstu.ru

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

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

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

Подписано в печать 15.12.2025. Дата выхода в свет 25.12.2025.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,75; уч.-изд. л. 18,00. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 042.

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», 2025

© Коллектив авторов, 2025

## 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: tstu@admin.tstu.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Автоматика. Информатика.</b>	
<b>Управление. Приборы</b> .....	538
<b>Карпушкин С. В., Мартьянов Е. И.</b> Комплекс программ оптимизации процесса механического перемешивания жидкости в вертикальной емкости .....	538
<b>Остроухов Д. Ю., Чернышова Т. И., Чернышов В. Н.</b> Микроволновый метод и реализующая его система неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий .....	552
<b>Балабанов П. В., Егоров А. С., Сенкевич С. А., Миронов А. Д., Буланова В. О., Бобров Д. А., Бугров В. А.</b> Моделирование системы управления наземной робототехнической платформой для сельского хозяйства .....	564
<b>Муромцев Д. Ю., Назаров В. Н., Дмитриевский Б. С., Воронков Р. В., Дмитриев Д. Г.</b> Математическая модель очистки монометиланилина в ректификационной колонне .....	577
<b>Арутюнян Р. В., Егоров С. Я., Некрасов С. А., Быковский Н. В.</b> Гибридный покоординатный спуск для дискретного размещения разногабаритных элементов .....	587
<b>Литвицкая А. В.</b> Построение многоуровневой модели для диалоговой процедуры выбора наилучшего решения .....	603
<b>Кахановский Д. В.</b> Математические модели и алгоритмы численного прогнозирования неблагоприятных орнитологических и метеорологических условий выполнения авиационных полетов .....	611
<b>Албахри М., Чернышов Н. Г., Полкунов К. А.</b> Исследование и моделирование асинхронного генератора со статическим синхронным компенсатором STATCOM .....	624
<b>Ануар Г. А.</b> Модели и методы определения оптимальной конструкции чувствительного элемента для датчиковой аппаратуры .....	634
<b>Процессы и аппараты химических и других производств. Химия</b> .....	648
<b>Долгунин В. Н., Жило А. А., Куди А. Н., Пронин В. А., Тараканов А. Г.</b> Квазитепловые потоки и массоперенос частиц при сдвиговом течении зернистых сред .....	648
<b>Галкин П. А., Селиванов Ю. Т., Зарандия Ж. А., Лазарев С. И., Абрамов М. С., Малин П. М.</b> Оптимизация физико-химических и технологических параметров непрерывного процесса полимеризации метилметакрилата в суспензии .....	662
<b>Щербакова Л. А., Уварова А. А., Сафаров Р. Р., Гордиенко М. Г.</b> Исследование свойств порошков с наполнителем, полученных распылительной сушкой .....	672
<b>Машиностроение. Металлообработка</b> .....	685
<b>Кулёмин В. В., Кайченев А. В.</b> Разработка конструкции прототипа строительного 3D-принтера .....	685
<b>Материаловедение. Нанотехнологии</b> .....	698
<b>Шубин И. Н.</b> Влияние связующих компонентов на характеристики компактированного углеродного материала .....	698

## CONTENTS

<b>Automation. Information Technology.</b>	
<b>Control. Instruments</b> .....	538
<b>Karpushkin S. V., Martyanov E. I.</b> A Software Package to Optimize the Mechanical Mixing of Liquids in a Vertical Tank.....	538
<b>Ostroukhov D. Yu., Chernyshova T. I., Chernyshov V. N.</b> The Microwave Method and its System of Non-Destructive Testing of Heat-Protective Properties of Building Materials and Products .....	552
<b>Balabanov P. V., Egorov A. S., Senkevich S. A., Mironov A. D., Bulanova V. O., Bobrov D. A., Bugrov V. A.</b> Simulation of the Control System for a Ground-Based Robotic Platform for Agriculture .....	564
<b>Muromtsev D. Yu., Nazarov V. N., Dmitrievsky B. S., Voronkov R. V., Dmitriev D. G.</b> Mathematical Model of Purification of Monomethylaniline in a Distillation Column.....	577
<b>Harutyunyan R. V., Egorov S. Ya., Nekrasov S. A., Bykovsky N. V.</b> Hybrid Coordinate Descent for Discrete Placement of Multi-Sized Components .....	587
<b>Litvitskaya A. V.</b> Construction of a Multilevel Model for the Dialogical Procedure of Selecting the Best Solution.....	603
<b>Kakhanovsky D. V.</b> Mathematical Models and Algorithms for Numerical Forecasting of Emergence of Adverse Ornithological and Meteorologicheskyy Conditions Performance of State Aviation .....	611
<b>Albakhri M., Chernyshov N. G., Polkunov K. A.</b> Research and Simulation of the IG Induction Generator with a Static Synchronous Compensator STATCOM .....	624
<b>Anuar G. A.</b> Models and Methods to Determine the Optimal Design of a Sensing Element for Sensor Equipment.....	634
<b>Chemical Engineering and Related Industries.</b>	
<b>Chemistry</b> .....	648
<b>Dolgunin V. N., Zhilo A. A., Kudi A. N., Pronin V. A., Tarakanov A. G.</b> Quasithermal Fluxes and Mass Transfer of Particles in Shear Flow of Granular Media .....	648
<b>Galkin P. A., Selivanov Yu. T., Zarandia Zh. A., Lazarev S. I., Abramov M. S., Malin P. M.</b> Optimization of Physicochemical and Process Parameters of a Continuous Methyl Methacrylate Suspension Polymerization Process .....	662
<b>Shcherbakova L. A., Uvarova A. A., Safarov R. R., Gordienko M. G.</b> Effect of Type and Concentration of Filler on the Completeness of Dose Extraction from a Breath-Actuated Inhaler .....	672
<b>Mechanical Engineering. Metal Treatment</b> .....	685
<b>Kulyomin V. V., Kaychenov A. V.</b> Development of a Prototype Design for Construction of 3D Printer.....	685
<b>Material Science. Nanotechnology</b> .....	698
<b>Shubin I. N.</b> The Effect of Binding Components on the Characteristics of Compacted Carbon Material.....	698

**КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА  
МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТИ  
В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ**

**С. В. Карпушкин<sup>1</sup>✉, Е. И. Мартьянов<sup>2</sup>**

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),  
karp@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;  
SciTex Group (2), Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** вычислительный эксперимент; комплекс программ; модель турбулентности; оптимизация процесса механического перемешивания; равномерность поля скоростей перемешиваемой жидкости; уравнения Навье–Стокса.

**Аннотация:** Рассмотрены структура и функции комплекса программ, реализующего методику оптимизации процесса механического перемешивания (ПМП) гомогенной жидкости в вертикальном емкостном аппарате, которая включает: математическую модель ПМП, разработанную на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и RNG  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности; постановку задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механических перемешивающих устройств (МПУ) с точки зрения дисперсии вектора скорости перемешиваемой жидкости; алгоритм решения задачи оптимизации, разработанный на основе теории многофакторного вычислительного эксперимента. Представлены результаты сравнения эффективности разработанного комплекса программ с популярными системами инженерного анализа, его применения для модификации параметров МПУ промышленного аппарата АО «Пигмент» (Тамбов).

---

**Введение**

В публикациях [1, 2] предложена методика оптимизации процесса механического перемешивания (ПМП) жидкости в вертикальной емкости, включающая математическую модель ПМП, постановку задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механических перемешивающих устройств (МПУ) вертикальных емкостных аппаратов и алгоритм ее решения.

Основными параметрами конструкции МПУ являются: диаметр мешалки  $D_m$ , ширина ее лопасти  $H_m$  и высота установки над днищем аппарата  $h_{hm}$ . Режим функционирования МПУ характеризуется частотой вращения вала мешалки  $n$ .

Исследуется установившееся движение гомогенной жидкости в вертикальной цилиндрической емкости, поэтому разработанная математическая модель ПМП включает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, дополненные полуэмпирической RNG  $k$ - $\varepsilon$ -моделью турбулентности, в цилиндрической системе координат.

При ее разработке приняты допущения об изотермичности ПМП и симметричности поля скоростей перемешиваемой жидкости относительно оси вращения мешалки, совпадающей с вертикальной осью симметрии емкостного аппарата.

Как следствие, моделируется двумерное поле скоростей перемешиваемой жидкости (по высоте  $l$  и радиусу  $r$  аппарата). Для решения разработанной математической модели ПМП использовалась кросс-компилированная версия blueCFD (Computational Fluid Dynamics) свободно распространяемого комплекса программ OpenFOAM [3]. Адекватность модели подтверждена результатами лабораторных экспериментов.

В качестве критерия эффективности ПМП использована дисперсия длины вектора скорости перемешиваемой жидкости, выбранная в качестве расчетной характеристики равномерности поля скоростей перемешиваемой жидкости в объеме аппарата, то есть отсутствия застойных зон и зон повышенных скоростей.

Алгоритм решения задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования МПУ разработан на основе теории планирования многофакторного вычислительного эксперимента. В качестве плана эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план (**ОЦКП**).

В работе [2] приведены результаты применения разработанной методики для оптимизации параметров конструкции лабораторного аппарата, оснащаемого двухлопастной, турбинной открытой и трехлопастной мешалкой с наклонными лопастями. Полученные оптимальные значения ширины лопастей этих мешалок превышают рекомендуемые документом [4] в 1,7 – 2,5 раза. Значения дополнительных параметров конструкций мешалок (число лопастей и диаметр диска турбинной открытой мешалки, угол наклона лопастей трехлопастной мешалки к горизонтали) определены методом перебора при оптимальных значениях основных.

В данной работе рассматривается структура, функции и результаты практического применения комплекса программ, реализующего предложенную методику оптимизации ПМП гомогенной жидкости в вертикальном емкостном аппарате. Представлению комплекса предшествует описание модификаций процедуры проверки адекватности математической модели, способа расчета значений критерия оптимальности и обоснования выбора вида полинома регрессии, формируемого по результатам вычислительного эксперимента.

### **Подтверждение адекватности предложенной математической модели ПМП**

Адекватность математической модели ПМП, представленной в [1, 2], подтверждается сравнением значений затрат мощности на перемешивание  $N$ , рассчитанных по результатам решения модели, измерений напряжения питания и силы тока, потребляемого электродвигателем привода мешалки лабораторного аппарата, при перемешивании гомогенной жидкости ( $U_{\text{ж}}$  и  $I_{\text{ж}}$ ) и вращении мешалки в пустом аппарате ( $U_{\text{п}}$  и  $I_{\text{п}}$ ).

Значения  $N$  рассчитываются по найденным в результате решения модели значениям компонент вектора скорости перемешиваемой жидкости по высоте и радиусу аппарата  $\bar{u}_{li}, \bar{u}_{ri}, i = 1, \dots, z$ , где  $z$  – число конечных элементов (**КЭ**), сформированных в объеме перемешиваемой жидкости, следующим образом:

$$N = M_{\text{кр}} 2\pi n, \quad (1)$$

где  $M_{\text{кр}} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z F_{\text{вти}} r_i$  – осредненный крутящий момент, необходимый для преодоления сил внутреннего трения в перемешиваемой жидкости;  $r_i$  – радиус расположения  $i$ -го КЭ, м;  $F_{\text{вти}} = \mu_{\text{эф}} \text{grad}(\bar{u}_i) s_i$  – сила внутреннего трения в  $i$ -м КЭ, Н;  $s_i$  – поверхность соприкосновения  $i$ -го КЭ с соседним по радиусу аппарата, м<sup>2</sup>;

$$\text{grad}(\bar{u}_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}_{li}}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_{li}}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_{ri}}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_{ri}}{\partial r}\right)^2}$$

– длина вектора градиента скорости жидкости в  $i$ -м КЭ.





**Рис. 1. Промышленный аппарат для проведения экспериментов**

Адекватность разработанной математической модели ПМП подтверждена и результатами эксперимента на промышленном аппарате ВЭЭ2–3–0,63–0,6У объемом  $0,63 \text{ м}^3$ , диаметром корпуса  $D_r = 1 \text{ м}$  и высотой  $H_r = 0,875 \text{ м}$ , открытая турбинная мешалка которого, установленная на высоте  $h_{hm} = 0,22 \text{ м}$  от днища, имеет диаметр  $D_m = 0,25 \text{ м}$ , ширину лопасти  $H_m = 0,12 \text{ м}$  (рис. 1). Аппарат заполнялся артезианской водой ( $0,47 \text{ м}^3$ ), подогретой до температуры  $20^\circ\text{C}$ , плотностью  $1027 \text{ кг/м}^3$ , кинематической вязкостью  $1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Отличие экспериментов на промышленном аппарате от лабораторного – использование привода МПУ, оснащенного электродвигателем переменного тока с короткозамкнутым ротором. Номинальное напряжение питания двигателя  $380 \text{ В}$ , номинальная частота вращения ротора  $750 \text{ мин}^{-1}$ , номинальный ток  $2,4 \text{ А}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,6$ , мощность  $550 \text{ Вт}$ . Расчет затрат мощности на перемешивание проводился по формуле [5]

$$N = \frac{\sqrt{3}(I_{\text{ж}}U_{\text{ж}} - I_{\text{п}}U_{\text{п}})\cos\varphi}{K_{\text{п}}}. \quad (3)$$

Аппарат (см. рис. 1) функционирует в одном из цехов АО «Пигмент» (Тамбов), поэтому изменения типа и геометрии мешалки были невозможны. Частота ее вращения изменялась с применением частотного преобразователя от  $100$  до  $360 \text{ мин}^{-1}$  с шагом  $20 \text{ мин}^{-1}$ . В таблице 1 сведены значения затрат мощности на перемешивание, рассчитанные по (1), согласно (3) по результатам измерений значений  $U_{\text{ж}}$  и  $I_{\text{ж}}$ ,  $U_{\text{п}}$  и  $I_{\text{п}}$ , а также по методике, рекомендуемой [4]. Сравнение результатов расчетов значений  $N$  по (1) и по (3) подтверждает адекватность используемой модели ПМП: отклонение не превышает  $3 \%$ .

Расчет затрат мощности на перемешивание в лабораторном аппарате, оснащенном электродвигателем постоянного тока, производился по формуле [5]:

$$N = \frac{I_{\text{ж}}U_{\text{ж}} - I_{\text{п}}U_{\text{п}}}{K_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент пусковых перегрузок, значения которого принимались согласно рекомендациям [4].

Отклонение значений  $N$ , рассчитанных по (1) и согласно (2), не превышает  $5 \%$ , что свидетельствует об адекватности предложенной в [1, 2] математической модели ПМП. Отмечены существенные отличия результатов расчетов значений затрат мощности на перемешивание по методике, рекомендуемой [4], от результатов экспериментов и расчетов по (1), (2) для открытой турбинной и трехлопастной мешалок.



Таблица 1

Результаты расчетов мощности перемешивания

Частота вращения мешалки, мин <sup>-1</sup>	Значение N, Вт		
	по (1)	по (3)	по [4]
100	6,316	6,188	7,430
120	7,016	6,978	12,045
140	9,067	8,953	18,129
160	10,95	10,719	25,841
180	11,834	11,719	35,333
200	15,873	15,928	46,751
220	18,353	18,030	60,237
240	19,575	19,082	75,926
260	21,391	21,189	93,952
280	30,444	30,800	114,444
300	36,503	35,543	137,528
320	42,197	41,202	163,329
340	50,461	49,760	191,966
360	53,149	52,262	223,559

Заметим, что результаты расчетов значений затрат мощности на перемешивание открытой турбинной мешалкой, согласно [4], существенно превышают результаты расчетов, согласно (1), (3): при  $n = 360 \text{ мин}^{-1}$  более, чем на 400 %.

### Критерий эффективности ПМП

Расчет критерия эффективности ПМП осуществляется по формуле

$$K_{svs} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (U_i - \bar{U}_i)^2, \tag{4}$$

где  $U_i = \sqrt{\bar{u}_{li}^2 + \bar{u}_{ri}^2}$  – длина вектора скорости перемешиваемой жидкости для  $i$ -го узла конечно-элементной расчетной модели, м/с;  $\bar{u}_{li}, \bar{u}_{ri}$  – компоненты вектора скорости перемешиваемой жидкости по высоте и радиусу аппарата для  $i$ -го узла, м/с;  $\bar{U}_i = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z U_i$  – среднее арифметическое значение  $U_i$  по объему перемешиваемой жидкости, м/с.

Минимальное значение критерия (4), равное нулю, соответствует абсолютной равномерности поля скоростей перемешиваемой жидкости, в том числе и отсутствию перемешивания, то есть  $n = 0$ . С другой стороны, в промышленной практике обычно увеличивают частоту вращения механических мешалок до максимально возможных значений, так как при этом возрастают скорости реализуемых технологических процессов (теплообмена, химических превращений). Следовательно, критерий (4) необходимо дополнить ограничением

$$n = \min \{ n_{\max}, n_p \}, \tag{5}$$

где  $n_{\max}$  – максимально допустимое значение  $n$ ,  $\text{с}^{-1}$ , определяемое конструкцией мешалки и свойствами перемешиваемой среды [4];  $n_p$  – значение  $n$ , определяемое мощностью привода МПУ,  $\text{с}^{-1}$ .

Анализ опыта промышленной эксплуатации вертикальных емкостей с МПУ показывает, что мощность двигателя привода мешалки  $P_{\text{дв}}$  обычно не превышает значения  $P_{\text{дв.доп}}$ , определяемого величиной рабочего объема аппарата (1 кВт на каждый  $\text{м}^3$ ), то есть значение  $n_p$  можно определить из ограничения

$$N \leq P_{\text{дв.доп}} / K_{\text{п}}.$$

С учетом возможности определения значения  $N$  согласно (1)

$$n_p \leq \frac{P_{\text{дв.доп}}}{2\pi M_{\text{кр}} K_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Таким образом, значение  $n$  для МПУ конкретного вертикального емкостного аппарата однозначно определяется соотношениями (5), (6), и задача оптимизации ПМП в этом аппарате сводится к поиску значений  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , которым соответствует поле скоростей перемешиваемой жидкости, минимизирующее значение критерия (4).

### Выбор вида полинома регрессии

Вычисление значения критерия (4), соответствующего комбинации фиксированных значений параметров  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , осуществляется по результатам расчета поля скоростей в объеме жидкости, перемешиваемой в исследуемом аппарате, то есть затраты времени на решение задачи оптимизации зависят в основном от необходимого количества расчетов поля скоростей. Минимальное число комбинаций фиксированных значений  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , при которых необходимо рассчитывать значения  $\bar{u}_{ji}, \bar{u}_{ri}$ ,  $i = 1, \dots, z$ , формируется согласно методике планирования многофакторного вычислительного эксперимента [6]. Критерий (4) аппроксимируется степенным полиномом, результатом поиска минимума которого являются оптимальные значения параметров МПУ.

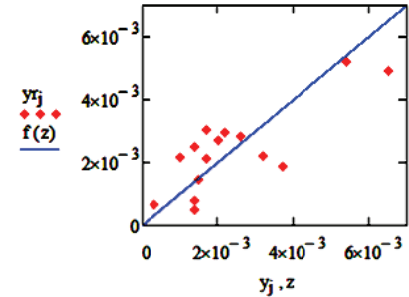
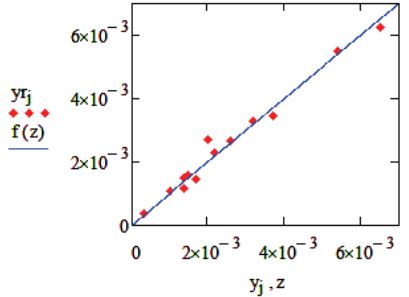
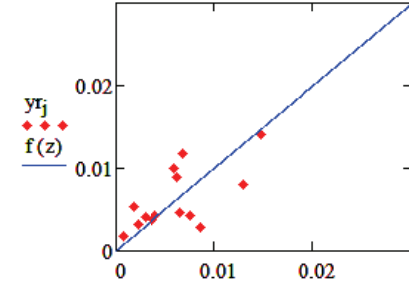
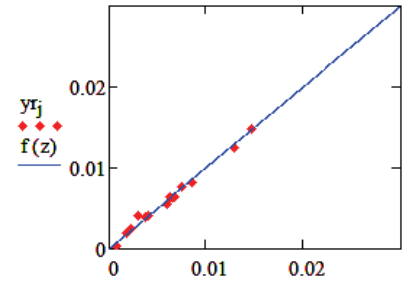
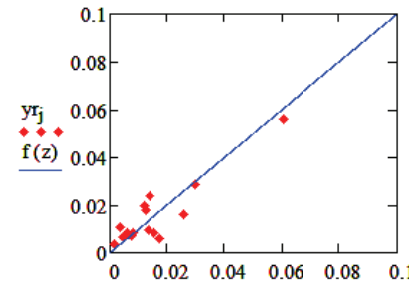
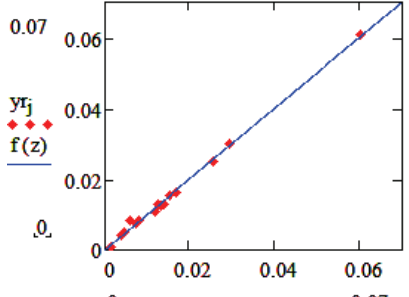
Предлагаемый алгоритм решения задачи предусматривает реализацию трехфакторного эксперимента: фиксирование значений  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$  на уровнях, соответствующих матрице плана эксперимента. Результирующая зависимость значения  $K_{\text{SVS}}$  от значений факторов должна иметь выраженный минимум, поэтому выбран план эксперимента второго порядка – ОЦКП [6].

При трех факторах ОЦКП предусматривает проведение 15 экспериментов на пяти уровнях варьирования каждого фактора, то есть формируемый полином регрессии может включать до 14 слагаемых. Это может быть как полный полином регрессии второго порядка, содержащий 11 слагаемых, так и неполный полином регрессии третьего порядка, дополнительно включающий слагаемые с факторами в третьей степени.

Процедуру обоснования выбора вида полинома регрессии рассмотрим на примере решения задач оптимизации для аппарата, который использовался для проведения лабораторного эксперимента: задач поиска оптимальных параметров конструкции МПУ, оснащаемого двухлопастной, турбинной открытой и трехлопастной мешалками. Натуральные значения факторов  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , соответствующие их кодированным значениям, предусмотренным матрицей ОЦКП, а также значения дополнительных параметров конструкций мешалок были зафиксированы согласно рекомендациям [4].

Таблица 2

Относительные ошибки полиномов регрессии

Мешалка	Полный полином второй степени	Неполный полином третьей степени
Двухлопастная		
	Ошибки: средняя 4 %, максимальная 25,8 %	Ошибки: средняя 1 %, максимальная 8,8 %
Турбинная открытая		
	Ошибки: средняя 2,7 %, максимальная 19,2 %	Ошибки: средняя 0,36 %, максимальная 4,9 %
Трехлопастная		
	Ошибки: средняя 2,7 %, максимальная 18,3 %	Ошибки: средняя 0,37 %, максимальная 5,1 %

Показателем степени соответствия значения полинома регрессии при фиксированных значениях факторов значению критерия (4), полученному в результате решения математической модели, служит относительная ошибка полинома регрессии [6]

$$\varepsilon = \frac{1}{N_{\Pi}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\Pi}} (y_i - y_{r_i})^2} \cdot \frac{1}{y_{\max} - y_{\min}}, \tag{7}$$

где  $y_i$ ,  $yr_i$  – значение критерия (4) в  $i$ -й точке плана, полученное в результате решения математической модели ПМП, и значение полинома регрессии в той же точке;  $y_{\max}$ ,  $y_{\min}$  – максимальное и минимальное значения  $yr_i$  в точках плана;  $N_{\text{п}}$  – число точек плана.

Если при выбранном порядке полинома регрессии значение  $\varepsilon > 5\%$ , рекомендуется переход к формированию полинома более высокого порядка.

В таблице 2 представлены графические интерпретации относительной ошибки (7) полиномов регрессии: полных полиномов второй и неполных полиномов третьей степени. Формально сформированные полиномы регрессии второго порядка для всех типов мешалок приемлемы (относительная ошибка меньше 5%), однако максимальные отклонения значений  $yr_i$  от  $y_i$  весьма существенны. Также следует отметить совпадение оптимальных значений ширины лопасти и высоты установки всех трех мешалок с границами интервалов варьирования их кодированных значений. Относительные ошибки полиномов третьего порядка существенно меньше и, кроме того, оптимальные значения параметров  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{lm}$  входят в интервалы их варьирования, выбранные для проведения вычислительных экспериментов [2]. Следовательно, неполные полиномы регрессии третьей степени более приемлемы для аппроксимации критерия (4).

### Комплекс программ оптимизации ПМП

В основе комплекса программ, реализующего представленную методику оптимизации ПМП гомогенной жидкости в вертикальном емкостном аппарате [7], лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных (как стационарных, так и нестационарных). В программе конечно-элементного анализа OpenFOAM большинство дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора выбран пользователем в процессе расчета. Таким образом, полностью разделяются формирование расчетной сетки КЭ (метод дискретизации), дискретизация основных уравнений и их решение.

Комплекс программ включает модули:

- 1 – ввода данных;
- 2 – формирования матрицы ОЦКП;
- 3 – построения конечно-элементной модели аппарата и МПУ;
- 4 – решения математической модели;
- 5 – определения параметров МПУ и вывода результатов (рис. 2).

В качестве основного языка программирования выбран Python, к преимуществам которого можно отнести [8]:

- использование высокоуровневых типов данных, причем их динамическая типизация короче, чем в программах на других языках того же уровня;
- поддержка общих методологий программирования: проектирования структур данных, объектно-ориентированного программирования;
- большой набор структур данных, внутренних функций, улучшенная обработка пространства имен;
- использование модулей и итераторов, поддержка множественного наследования;
- поддержка основных структур графического интерфейса пользователя (GUI);
- самый короткий код среди однопользовательских языков программирования.



Рис. 2. Состав и структура комплекса программ оптимизации ПМП

В модуле 1 осуществляется ввод значений диаметра  $D_r$  и высоты  $H_r$  корпуса аппарата, объема  $V$  перемешиваемой жидкости, ее плотности  $\rho$  и кинематической вязкости  $\nu$ , указывается тип и число мешалок, типы, размеры и расположение внутренних устройств, определяется высота  $L$  заполнения аппарата без перемешивания и проверяется условие отсутствия переполнения при перемешивании

$$L \leq H_r / 1,2.$$

В модуле 2 осуществляется расчет частоты вращения вала МПУ согласно (5), (6), задаются уровни натуральных значений параметров  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , определяются их кодированные значения, формируется матрица ОЦКП.

Модуль 3 предназначен для генерации трехмерной геометрической модели аппарата и мешалки.

Для разбиения модели на КЭ применяется библиотека параметрического 3D-моделирования ZenCAD, использующая геометрическое ядро граничного представления OpenCascade и язык общего назначения Python [9]. ZenCAD может использоваться как самостоятельная система быстрого прототипирования для целей макетирования или 3D-печати, так и в комплексе с библиотеками Python для построения 3D-моделей.

В модуле 4 осуществляется решение математической модели ПМП с применением программы, разработанной на основе OpenFOAM, для каждой комбинации кодированных значений параметров, предусмотренной матрицей ОЦКП, расчет соответствующих значений критерия (4).

Модуль 5 осуществляет формирование полинома регрессии, поиск его минимума, расчет оптимальных натуральных значений параметров  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , выбор оптимальных значений дополнительных параметров и вывод результатов в окне комплекса программ (рис. 3).

Проведено сравнение разработанного комплекса программ с популярными системами инженерного анализа ANSYS Fluent [10] и COMSOL Multiphysics [11] по точности получаемых результатов и быстродействию. В качестве тестовой задачи использовалась задача расчета поля скоростей и затрат мощности на перемешивание в лабораторном аппарате [1, 2] с двухлопастной мешалкой при тех же параметрах перемешиваемой жидкости, что и при проверке адекватности математической модели ПМП.

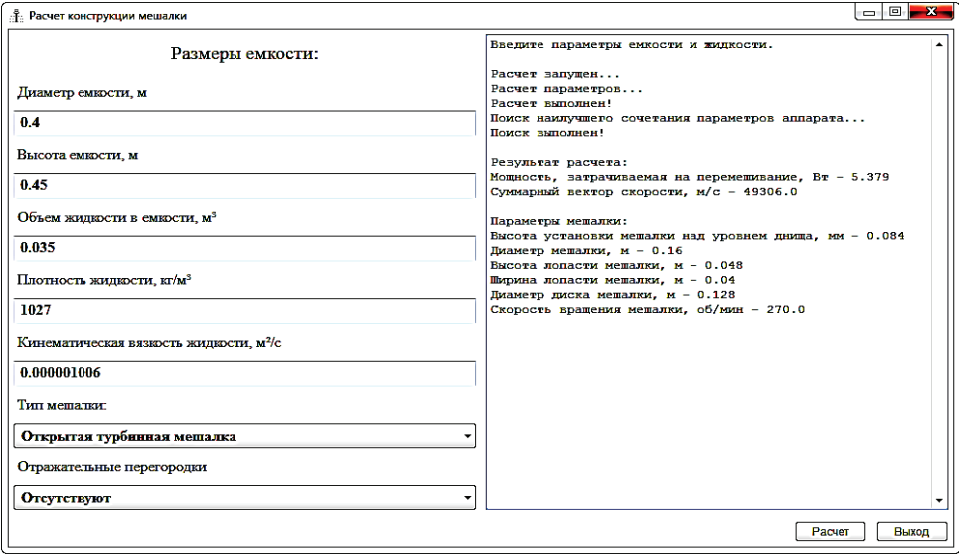


Рис. 3. Скриншот окна комплекса программ

Таблица 3

Сравнение программ расчета поля скоростей ПМП

Программа	Частота вращения мешалки $n$ , об/мин	Мощность $N$ , мВт	Отклонение значения мощности от расчета в разработанной системе, %	Число конечных элементов в модели	Продолжительность расчета, мин	Отклонение по времени от расчета в разработанной системе, %
ANSYS Fluent	20	9,12	+3	220 103	178	+12
	40	17,18	+4		178	+15
	60	27,69	+4		180	+15
	80	36,63	+3		184	+14
	100	42,16	+3		179	+16
COMSOL Multiphysics	20	9,00	+2	213 692	199	+24
	40	16,98	+3		196	+25
	60	27,32	+3		196	+24
	80	36,77	+4		199	+24
	100	42,08	+3		196	+24
Разработанный комплекс программ оптимизации ПМП	20	8,82	—	210 401	162	—
	40	16,49			166	
	60	26,52			168	
	80	35,36			171	
	100	40,85			169	

Значения мощности, затрачиваемой на перемешивание, полученные разными программами, различаются менее чем на 5 %, что свидетельствует о корректности используемой модели и выбранного уровня густоты сетки конечных элементов (табл. 3).



При сравнимом количестве КЭ, формируемых в 3D-модели аппарата и мешалки, очевидно преимущество разработанного комплекса программ с точки зрения продолжительности расчета с учетом затрат времени на разработку и переработку 3D-модели аппарата и мешалки при изменении значений  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ .

**Результаты практического применения комплекса программ**

Разработанный комплекс программ оптимизации ПМП применен для модификации конструкции МПУ промышленного аппарата, оснащенного якорной мешалкой, который установлен в цехе № 15 АО «Пигмент» (Тамбов) и реализует процесс репульпации пасты фталоцианина меди в водном растворе серной кислоты при температуре 200 °С и атмосферном давлении. При существующей конструкции МПУ наблюдается неравномерное начальное распределение частиц пасты в объеме перемешиваемой жидкости и, как следствие, их прилипание к стенкам корпуса и спекание.

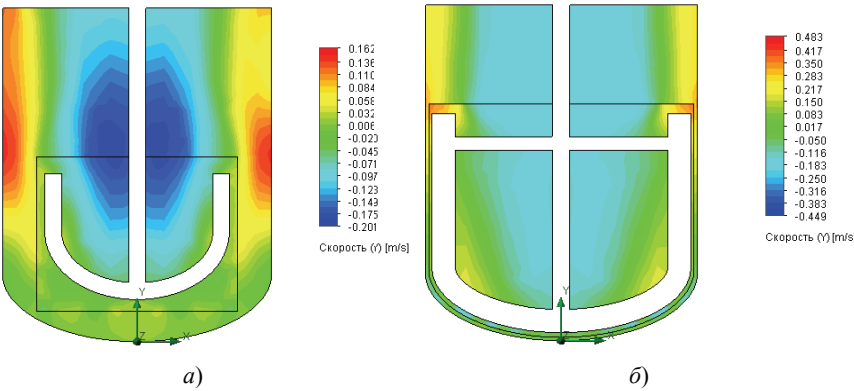
Цель работ по модификации существующего МПУ – повышение степени равномерности начального распределения пасты фталоцианина меди по объему аппарата и устранение прилипания ее частиц к стенкам аппарата, сокращение продолжительности стадии репульпации и снижение энергопотребления аппарата.

Поле скоростей жидкости, перемешиваемой мешалкой существующей конструкции, представлено на рис. 4, а. Как видно, скорости жидкости в центральной и периферийной зонах объема аппарата существенно различаются (значение критерия (4)  $K_{SVS} = 5,46$ ), что, очевидно, и приводит к неравномерному начальному распределению частиц пасты фталоцианина меди по объему аппарата.

В результате решения задачи оптимизации ПМП установлено, что минимальному значению дисперсии длины вектора скорости жидкости в аппарате  $K_{SVS} = 1,34$  соответствуют значения параметров конструкции МПУ, представленные в табл. 4. Оптимальное значение дополнительного параметра конструкции мешалки – высоты ее лопасти  $B_m$  – определено методом перебора при оптимальных значениях  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ .

Как видно, результаты оптимизации параметров конструкции МПУ отличаются от рекомендаций [4] по конструкциям МПУ с якорными мешалками.

Таким образом, за счет модификации конструкции МПУ удалось существенно повысить степень равномерности поля скоростей жидкости в аппарате (см. рис. 4, б): значение критерия (4) уменьшилось более чем в 4 раза. Дополнительная поперечная перемычка установлена для обеспечения необходимой прочности лопастей модифицированной мешалки.



**Рис. 4. Поле скоростей жидкости в аппарате для репульпации при начальной (а) и итоговой (б) конструкциях МПУ**

Таблица 4

Результаты оптимизации ПМП в промышленном аппарате

Значения параметров конструкции МПУ			
Диаметр мешалки	Высота установки мешалки	Ширина лопасти	Высота лопасти
<i>Результаты оптимизации</i>			
$D_m = 0,95D_r$	$h_{hm} = 0,05D_m$	$H_m = 0,15D_m$	$B_m = 0,85D_m$
<i>Рекомендации [4] для якорных мешалок</i>			
$D_m / D_r = 0,7 \dots 0,9$	$h_{hm} \geq 0,5(D_r - D_m)$	$H_m / D_m = 0,1$	$B_m / D_m = 0,7$

Для подтверждения эффективности модифицированной конструкции и измененной высоты расположения мешалки над днищем аппарата была реализована обработка нескольких пробных партий пасты фталоцианина меди. По ее результатам сделаны следующие выводы:

- образование отложений на стенках корпуса аппарата практически отсутствует;
- необходимую продолжительность стадии репульпации можно сократить с 20 до 18 ч, а поскольку она является лимитирующей по времени в процессе производства фталоцианина меди, то мощность производства можно увеличить с 1188 до 1320 т/год;
- мощность привода МПУ можно уменьшить на 16 %.

Заключение

Затраты мощности на перемешивание гомогенной жидкости в вертикальной емкости с МПУ рассчитываются по значениям осредненного крутящего момента, необходимого для преодоления сил внутреннего трения в перемешиваемой жидкости, найденным по результатам решения математической модели ПМП.

Адекватность разработанной математической модели ПМП подтверждена результатами эксперимента на промышленном аппарате, установленном в одном из цехов АО «Пигмент» (Тамбов): отклонение значений затрат мощности на перемешивание, рассчитанных по результатам решения модели и результатам измерений напряжения питания и силы тока, потребляемого электродвигателем привода мешалки при перемешивании гомогенной жидкости и вращении мешалки в пустом аппарате, не превышает 3 %.

Значение частоты вращения вала МПУ конкретного вертикального емкостного аппарата однозначно определяется конструкцией мешалки и свойствами перемешиваемой среды, а также значением затрат мощности на перемешивание, то есть задача оптимизации ПМП сводится к поиску значений диаметра и ширины лопасти мешалки, высоты ее расположения над днищем аппарата, которым соответствует поле скоростей перемешиваемой жидкости, минимизирующее дисперсию длины вектора ее скорости.

Выбор вида полинома регрессии, аппроксимирующего зависимость дисперсии длины вектора скорости перемешиваемой жидкости от параметров конструкции МПУ, осуществляется не только по значению относительной ошибки полинома регрессии, но и по максимальным отклонениям значений критерия оптимальности ПМП от значений полинома регрессии в тех же точках плана вычислительного эксперимента.

Разработанный комплекс программ оптимизации ПМП включает модули ввода данных и формирования матрицы ОЦКП, написанные на языке Python, построения конечно-элементной модели аппарата и МПУ, разработанного в среде параметрического 3D-моделирования ZenCAD, решения математической модели ПМП, разработанного в среде конечно-элементного моделирования OpenFOAM, определения параметров МПУ и вывода результатов, написанного на языке Python. Сравнение результатов применения комплекса с результатами применения популярных систем инженерного анализа ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics подтвердило его эффективность.

В результате применения комплекса программ для решения задачи оптимизации параметров МПУ промышленного аппарата АО «Пигмент» (Тамбов) предложены модификации его конструкции, позволившие устранить образование отложений на стенках аппарата, сократить на 10 % продолжительность стадии репульсации пасты фталоцианина меди, уменьшить на 16 % затраты мощности на перемешивание.

#### *Список литературы*

1. Мартянов, Е. И. Оптимизация процесса перемешивания жидкости в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами / Е. И. Мартянов, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 280 – 293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293
2. Карпушкин, С. В. Оптимизация параметров механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, Е. И. Мартянов // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 6. – С. 41 – 48.
3. OpenFOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред. – URL : <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (дата обращения: 10.06.2024).
4. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчета. – Введ. 1986-01-01. – Л.: РТП ЛениНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
5. Скорняков, В. А. Общая электротехника и электроника : учебник для вузов / В. А. Скорняков, В. Я. Фролов. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 176 с.
6. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учебное пособие / Н. И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2012. – 399 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613829. Программа оптимизации конструктивных параметров и режима функционирования механических перемешивающих устройств : № 2023612580 : заявл. 09.02.2023 : опубл. 20.02.2023 / Мартянов Е. И., Карпушкин С. В. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – 1 с.
8. Гид по языкам программирования: решения для конкретных задач. – URL : <https://www.techinsider.ru/technologies/758873-gid-po-yazykam-programmirovaniya-resheniya-dlya-konkretnyh-zadach> (дата обращения: 15.05.2024).
9. Система скриптового 3D моделирования ZenCad. – URL : <https://habr.com/ru/post/443140> (дата обращения: 15.05.2024).
10. Шаблий, Л. С. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent : учебное пособие / Л. С. Шаблий, А. В. Кривцов, Д. А. Колмакова. – Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.
11. Красников, Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета COMSOL Multiphysics : учебное пособие / Г. Е. Красников, О. В. Нагорнов, Н. В. Старостин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.

# A Software Package to Optimize the Mechanical Mixing of Liquids in a Vertical Tank

S. V. Karpushkin<sup>1</sup>✉, E. I. Mart'yanov<sup>2</sup>

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),  
karp@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia;  
SciTex Group (2), Tambov, Russia*

**Keywords:** computational experiment; software package; turbulence model; mechanical mixing process optimization; uniformity of the mixed fluid velocity field; Navier-Stokes equations.

**Abstract:** The article considers the structure and functions of a software package implementing a methodology for optimizing the mechanical mixing process (MMP) of a homogeneous liquid in a vertical tank apparatus. The package includes: a mathematical model of the MMP developed on the basis of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model; a formulation of the problem of optimizing the design parameters and operating mode of mechanical mixing devices (MMD) from the point of view of the dispersion of the velocity vector of the mixed liquid; an algorithm for solving the optimization problem developed based on the theory of a multifactorial computational experiment. The article presents the results of a comparison of the effectiveness of the developed software package with popular engineering analysis systems, and its application to modify the MMD parameters of the industrial apparatus of Pigment JSC (Tambov).

## References

1. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V. [Optimization of the liquid mixing process in vertical tank apparatuses with mechanical mixing devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 280-293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Karpushkin S.V., Mart'yanov Ye.I. [Optimization of the parameters of mechanical mixing devices of vertical tank apparatuses], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical Industry Today], 2024, no. 6, pp. 41-48. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Available at: <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (accessed 10 June 2024).
4. Rukovodyashchiy normativnyy dokument RD 26-01-90-85: *Mekhanicheskiye peremeshi-vayushchiye ustroystva, metod rascheta* [Mechanical mixing devices, calculation method], Leningrad: RTP LenNIKhimmasha, 1985, 257 p. (In Russ.)
5. Skornyyakov V.A., Frolov V.Ya. *Obshchaya elektrotehnika i elektronika: uchebnik dlya vuzov* [General electrical engineering and electronics: a textbook for universities], St. Petersburg: Lan', 2021, 176 p. (In Russ.).
6. Sidnyayev N.I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh: uchebnoye posobiye* [Theory of Experimental Planning and Analysis of Statistical Data: a tutorial], Moscow: Yurayt, 2012, 399 p. (In Russ.)
7. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V. *Programma optimizatsii konstruktivnykh parametrov i rezhima funktsionirovaniya mekhanicheskikh peremeshivayushchikh ustroystv* [Program for Optimizing the Design Parameters and Operating Mode of Mechanical Mixing Devices], No. 2023613829. (In Russ.).
8. Available at: <https://www.techinsider.ru/technologies/758873-gid-po-yazykam-programmirovaniya-resheniya-dlya-konkretnyh-zadach> (accessed 15 May 2024).
9. Available at: <https://habr.com/ru/post/443140> (accessed 15 May 2024).

10. Shabliy L.S., Krivtsov A.V., Kolmakova D.A. *Komp'yuternoye modelirovaniye tipovykh gidravlicheskikh i gazodinamicheskikh protsessov dvigateley i energeticheskikh ustanovok v Ansys Fluent: uchebnoye posobiye* [Computer modeling of typical hydraulic and gas-dynamic processes of engines and power plants in Ansys Fluent: a tutorial], Samara: Izdatel'stvo Samar. un-ta, 2017, 108 p. (In Russ.).

11. Krasnikov G.Ye., Nagornov O.V., Starostin N.V. *Modelirovaniye fizicheskikh protsessov s ispol'zovaniyem paketa COMSOL Multiphysics: uchebnoye posobiye* [Modeling of physical processes using the COMSOL Multiphysics package: a tutorial], Moscow: NIYAU MIFI, 2012, 184 p. (In Russ.)

---

### **Softwarekomplex zur Optimierung des Prozesses des mechanischen Mischens von Flüssigkeiten in einem vertikalen Behälter**

**Zusammenfassung:** Es sind die Struktur und Funktionen eines Softwarekomplexes betrachtet, der die Methodik zur Optimierung des Prozesses der mechanischen Durchmischung (Mischprozess) einer homogenen Flüssigkeit in einem vertikalen Behälterapparat realisiert. Dieser umfasst: ein mathematisches Modell des Mischprozesses, das auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen und dem RNG  $k-\varepsilon$  Turbulenzmodell basiert; die Formulierung der Aufgabe zur Optimierung der Konstruktionsparameter und des Betriebsregimes mechanischer Rührgeräte (MRG) aus der Perspektive der Dispersion des Geschwindigkeitsvektors der durchmischten Flüssigkeit; einen Lösungsalgorithmus für das Optimierungsproblem, der auf der Theorie des multifaktoriellen computergestützten Experiments entwickelt worden ist. Die Ergebnisse des Vergleichs der Effizienz des entwickelten Softwarekomplexes mit beliebigen Systemen der Ingenieuranalyse sowie dessen Anwendung zur Modifizierung der Parameter von MRG in der Industrieanlage der AO „Pigment“ (Tambow) sind präsentiert.

---

### **Ensemble de programmes d'optimisation du processus d'agitation mécanique du liquide dans la cuve verticale**

**Résumé:** Sont examinées la structure et les fonctions de l'ensemble de programmes qui régissent la méthode d'optimisation du processus du mélange mécanique (PMM) d'un liquide homogène dans un dispositif capacitif vertical, qui comprend: un modèle mathématique de PMM développé à la base des équations de Navier-Stokes, moyennes de Reynolds, et RNG  $k-\varepsilon$  du modèle de turbulence; le problème d'optimisation des paramètres de la conception et du mode du fonctionnement des dispositifs du mélange mécanique (DMM) du point de vue de la dispersion du vecteur de la vitesse du liquide mélangé; l'algorithme de la résolution des problèmes d'optimisation développé à la base de la théorie de l'expérience de calcul multifactorielle. Sont présentés les résultats de la comparaison de l'efficacité de l'ensemble des programmes mis au point avec les systèmes populaires d'analyse en ligne, leur utilisation pour la modification des paramètres de DMM de l'appareil industriel de la société anonyme de type ouvert «Pigment» (Tambov).

---

**Авторы:** *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Мартьянов Евгений Игоревич* – кандидат технических наук, руководитель SciTex Group (ИП Мартьянов Е. И.), Тамбов, Россия.

## МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И РЕАЛИЗУЮЩАЯ ЕГО СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Д. Ю. Остроухов<sup>1✉</sup>, Т. И. Чернышова<sup>2</sup>, В. Н. Чернышов<sup>1</sup>

*Кафедры: «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (1),  
Denistambov359@gmail.com; «Конструирование радиоэлектронных  
и микропроцессорных систем» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** адаптивная информационно-измерительная система; анализ источников погрешностей; подвижный СВЧ-источник тепла; тепло- и теплопроводность; тепловые потери от лучистого и конвективного теплообмена.

**Аннотация:** Предложены метод и реализующая его измерительно-управляющая система определения теплофизических характеристик (тепло- и теплопроводности) материалов и готовых изделий при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного точечного СВЧ-источника тепла на исследуемые объекты. Отмечено, что отличительной особенностью предложенного метода является компенсация влияния тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду от лучистого и конвективного теплообмена на результаты измерения за счет адаптивного поиска точек контроля измеряемой температуры на поверхности исследуемых изделий, в которых неучтенные тепловые потери в окружающую среду равны между собой и компенсируются.

---

### Введение

В настоящее время остро стоит вопрос о рациональном использовании топливно-энергетических ресурсов, в связи с чем активно ведется синтез различных теплоизолирующих материалов с использованием нанотехнологий (пенобетонов, газонаполненных пенопластов и т.д.), теплозащитные свойства которых существенно выше по сравнению с традиционными материалами. Кроме того, часто в строительной теплотехнике возникает задача определения теплозащитных свойств готовых многослойных конструкций, теплофизические свойства (ТФС) которых в процессе эксплуатации могут меняться из-за воздействия различных дестабилизирующих факторов. При этом важно сохранить целостность исследуемых строительных объектов. Поэтому задача контроля ТФС материалов и готовых изделий с сохранением их эксплуатационных характеристик является актуальной, и для ее решения необходимо создавать новые методы и информационно-измерительные системы (ИИС) неразрушающего контроля (НК) ТФС исследуемых объектов.

### Анализ существующих методов контроля ТФС и разработка нового метода НК ТФС и реализующей его системы

Существующие методы контроля ТФС материалов и изделий имеют ряд недостатков, таких как необходимость изготовления образца материала заданных геометрических размеров и формы, что требует разрушения готовых изделий,



а также недостаточная точность и длительное время проведения теплофизических измерений [1 – 4].

Хорошо проработанная теория распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона [5 – 7], а также большое количество различной микроволновой техники, выпускаемой промышленностью, и возможность осуществления с ее помощью нагрева поверхностей исследуемых объектов делает методы бесконтактного неразрушающего контроля ТФС с использованием энергии СВЧ-излучения наиболее актуальными.

Существующие микроволновые методы контроля ТФС материалов и изделий [8 – 13] имеют некоторые недостатки, а именно, не компенсируют потери тепла с поверхности нагреваемых изделий в окружающую среду, что существенно снижает точность и достоверность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых объектов.

В работе предлагаются метод и реализующая его система, позволяющая существенно повысить точность искомых ТФС за счет компенсации неучтенных тепловых потерь в окружающую среду с поверхности исследуемых объектов.

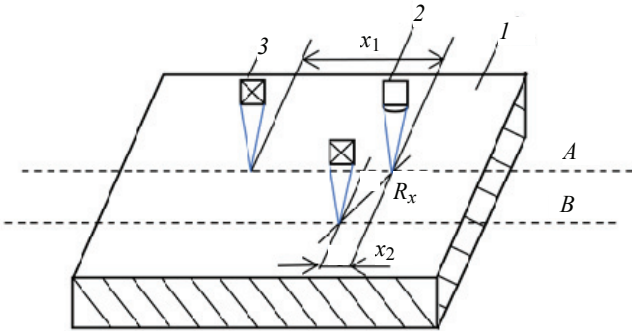
Сущность предлагаемого метода НК ТФС материалов и изделий заключается в следующем.

На поверхность исследуемого объекта 1 воздействуют точечным микроволновым источником тепла 2 заданной мощностью  $q_1$ , движущимся равномерно относительно объекта со скоростью  $V$  по линии  $A$  в направлении оси  $x$  (рис. 1). Источник СВЧ-излучения выполнен в виде рупорно-линзовой антенны, сфокусированной на поверхность исследуемого объекта в виде круга диаметром 0,001 мм. При этом частоту СВЧ-излучения определяют по соотношению

$$F = \frac{1}{z^2 \pi \mu_0 \mu \varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\mu_0, \mu$  – магнитные диэлектрические проницаемости соответственно вакуума (абсолютная) и исследуемого материала;  $\varepsilon$  – удельная диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Задают глубину проникновения электромагнитной волны в исследуемые материалы  $z = 2 \dots 3$  мм, и по соотношению (1) определяют частоту СВЧ-излучения с использованием информации о магнитной и удельной диэлектрической проницаемости исследуемого материала. Затем постепенно смещают термодатчик 3 на линии  $A$  по оси  $x$  в сторону отставания от источника 2 до момента достижения измеряемой избыточной температуры поверхности исследуемого объекта заданного значения  $T_1$  и измеряют расстояние  $x_1$ .



**Рис. 1. Схема перемещения точечного СВЧ-источника тепла и термодатчика над поверхностью исследуемого объекта**

Далее термоприемник 3 начинают перемещать по линии  $B$  в сторону источника энергии 2 до момента, когда измеряемое значение избыточной температуры станет равным  $T_1$ , и измеряют расстояние  $R_x$  между источником энергии 2 и термоприемником 3.

Процесс распространения теплоты на поверхности исследуемого тела в точках, перемещающихся вслед за источником со скоростью источника по линии  $A$ , описывается выражением

$$T_1(x) = \frac{q_1}{2\pi\lambda x_1}, \quad (2)$$

где  $T_1(x)$  – избыточная температура на поверхности тела;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности исследуемого объекта;  $q_1$  – мощность источника СВЧ-излучения.

Избыточная температура на поверхности исследуемого объекта в точках на линии  $B$  описывается выражением

$$T_2(R, x) = \frac{q_1}{2\pi R_x \lambda} \exp\left[-\frac{V(R_x - x_2)}{2a}\right], \quad (3)$$

где  $R_x$  – расстояние между источником излучения и термоприемником;  $x_2$  – расстояние между проекцией точки контроля температуры на расстоянии  $R_x$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности исследуемого материала.

Поскольку в предлагаемом методе избыточное значение заданной температуры  $T_1$  равно  $T_2$ , то приравняв выражения (2) и (3) и сделав ряд несложных математических операций, получим формулу для расчета коэффициента температуропроводности:

$$a = \frac{V(x_2 - R_x)}{2 \ln \frac{R_x}{x_1}}. \quad (4)$$

Так как температуры на поверхности исследуемого объекта в контролируемых точках на расстоянии  $x_1$  на линии  $A$  и  $R_x$  на линии  $B$  равны, то и потери от лучистого и конвективного теплообмена в окружающую среду, определяемые по соотношениям (5) и (6), тоже равны, поэтому на результаты измерения температуропроводности  $a$  эти потери не влияют:

$$\Delta q_k = a_k(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})S, \quad (5)$$

где  $\Delta q_k$  – конвективные потери;  $a_k$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{с}}$  – температуры поверхности нагретого тела и окружающей среды соответственно, К;  $S$  – площадь теплоотдающей поверхности, м<sup>2</sup>;

$$\Delta q_{\text{л}} = a_{\text{л}}(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})S = C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] S, \quad (6)$$

$\Delta q_{\text{л}}$  – лучистые потери;  $a_{\text{л}}$  – коэффициент лучистого теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $C_0 = 5,67$  – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Для определения теплопроводности исследуемого материала увеличивают мощность источника  $q_1$  на 10 % и измеряют избыточную температуру поверхности исследуемого объекта на расстоянии  $R_x$  на линии  $B$ . При этом измеренная избыточная температура  $T_3$  определяется выражением

$$T_3(R, x) = \frac{q_2}{2\pi R_x \lambda} \exp \left[ -\frac{V(R_x - x_2)}{2a} \right], \quad (7)$$

где  $q_2$  – увеличенная мощность источника СВЧ-излучения.

После несложных математических преобразований выражений (3) и (7) найдем формулу, по которой определяется искомая теплопроводность:

$$\lambda = \frac{q_2 - q_1}{2\pi R_x \Delta T} \exp \left[ -\frac{V(x_2 - R_x)}{2a} \right], \quad (8)$$

где  $\Delta T$  – разница температур  $T_3$  и  $T_2$ .

В процессе нагревания поверхности полуограниченного исследуемого материала неизбежно возникают потери в окружающую среду  $\Delta q_{\text{пот}}$ , которые состоят из лучистого и конвективного теплообмена и определяются по соотношению

$$\Delta q_{\text{пот}} = \Delta q_{\text{к}} + \Delta q_{\text{л}}. \quad (9)$$

Мощность источника тепла с учетом потерь описывается формулами:

$$q_1 = q_{\text{ист1}} - \Delta q_{\text{пот1}}; \quad (10)$$

$$q_2 = q_{\text{ист2}} - \Delta q_{\text{пот2}}, \quad (11)$$

где  $q_{\text{ист1}}$  и  $q_{\text{ист2}}$  – истинные значения соответственно начальной мощности точечного источника теплового излучения и увеличенной.

Потери тепловой энергии в окружающую среду при прохождении точки контроля температуры расстояния от области нагрева до точки с координатой  $R_x$  при мощности источника  $q_1$  определяются выражением

$$\Delta q_{\text{пот1}} = \int_0^{R_x} (T_2(R_x, x) - T_c) dR = S_1(R_x). \quad (12)$$

Потери тепла при увеличении мощности до  $q_2$

$$\Delta q_{\text{пот2}} = \int_0^{R_x} (T_3(R_x, x) - T_c) dR = S_2(R_x). \quad (13)$$

Так как площади, определяемые соотношениями (12) и (13), почти равны (рис. 2), то и потери  $\Delta q_{\text{пот2}} \approx \Delta q_{\text{пот1}}$  практически равны,  $\Delta S$  – разница между  $S_2$  и  $S_1$ .

Для определения тепловых потерь от лучистого и конвективного теплообмена необходимо рассчитать площадь теплоотдающей поверхности (см. формулы (5) и (6)), чтобы рассчитать потери с поверхности исследуемого изделия.

На рисунке 3 представлены площади эллипсов теплоотдающей поверхности  $S_1 - S_5$  со средней температурой для каждого из них, полученные с использованием соотношения (3). Разбиение теплоотдающей поверхности исследуемого тела осуществлялось таким образом, что средняя температура в каждом эллипсе отличается не более чем  $10^\circ\text{C}$ , что вполне обеспечивает необходимую точность расчетов.

Результаты потерь тепла для мощности СВЧ-источника  $q_1$  и  $q_2$  приведены в табл. 1.

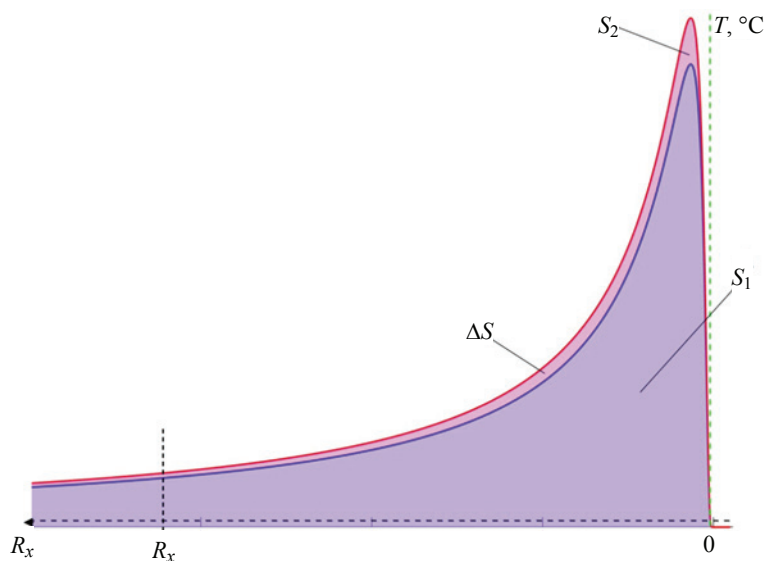


Рис. 2. Интегральное значение температур на поверхности исследуемого объекта при мощности источника  $q_1$  и  $q_2$

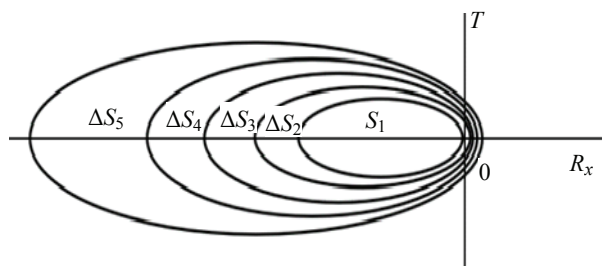


Рис. 3. Изотермы температурного поля на поверхности исследуемого объекта от движущегося с постоянной скоростью точечного источника тепла СВЧ-излучения ( $S_1$  – площадь первого наиболее нагретого эллипса поверхности тела;  $\Delta S_2$  – разница между  $S_1$  и  $S_2$  равной  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , далее  $\Delta S_i = \Delta S_{i+1} - \Delta S_i$ , где  $i$  – номер эллипса)

Таблица 1

Результаты тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду

Номер эллипса теплоотдающей поверхности	$S_1, \Delta S_i, \text{ м}^2$	$\Delta q_{\text{пот1}}, \text{ Вт}$	$\Delta q_{\text{пот1}}, \%$	$\Delta q_{\text{пот2}}, \text{ Вт}$	$\Delta q_{\text{пот2}}, \%$
1	0,0045	4,5	9	5,2	9,5
2	0,0018	1,44	2,8	1,6	3,2
3	0,0034	2,04	4,1	2,4	4,4
4	0,0081	3,24	6,5	3,76	6,8
5	0,0328	6,56	13,1	7,6	13,8
$\Sigma S_1 + \Delta S_i, \Sigma \Delta q_{1,2}$	0,0506	17,78	35,6	20,56	37,4

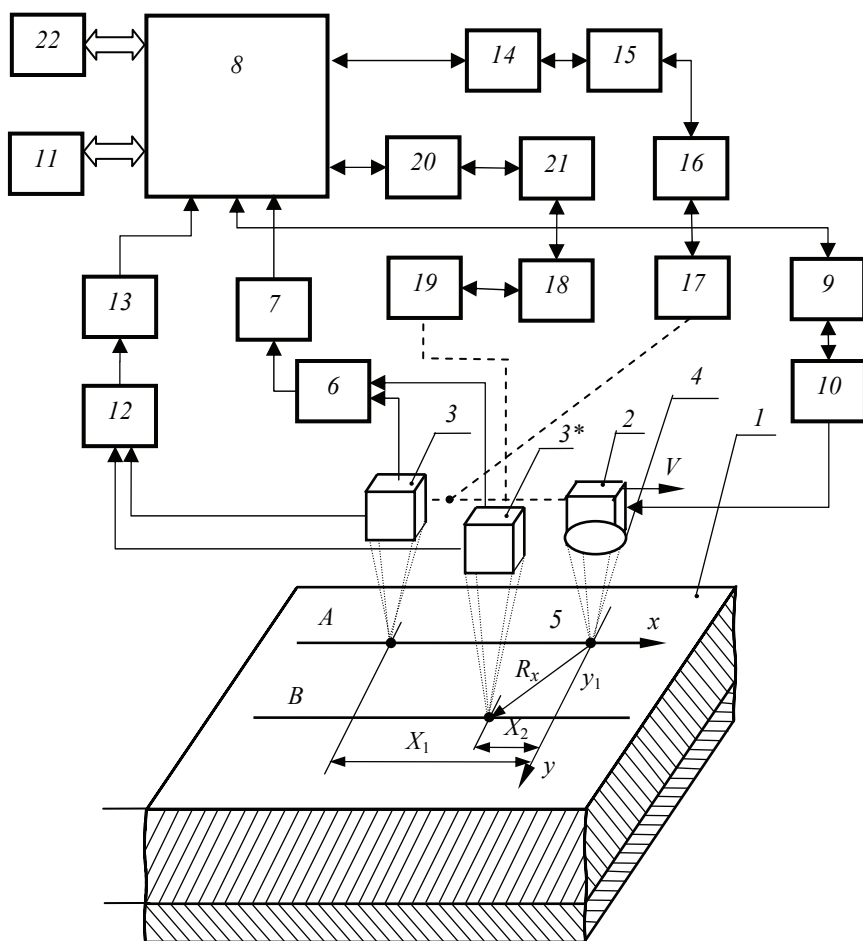


Рис. 4. Блок-схема микропроцессорной ИИС, реализующая предложенный метод

Результаты расчета показали, что при мощности  $q_1$  суммарные потери  $\Delta q_{\text{пот1}}$  составляют 35,6 %. При увеличении мощности на 10 % суммарные потери  $\Delta q_{\text{пот2}}$  увеличатся до 37,4 %. Отсюда около 98 % потерь при нахождении теплопроводности исследуемого объекта скомпенсируются.

Для реализации предложенного метода неразрушающего контроля ТФС материалов разработана микропроцессорная система, блок-схема которой представлена на рис. 4. Над исследуемым материалом 1 на линии движения А помещают точечный источник тепловой СВЧ-энергии 2 и бесконтактный термодатчик 3, сфокусированные на поверхность, подверженную тепловому воздействию. При этом с помощью линзы из радиопрозрачного материала 4 (фторопласт) излучение фокусируют в точку теплового воздействия 5. Информацию о значении температуры в точках контроля снимают термодатчиком 3, сфокусированным в точки на линии А и В поверхности исследуемого объекта. Значения температур с термодатчика 3 поступают на нормирующий прецизионный усилитель 6 и через АЦП 7 поступают на микропроцессор 8, соединенный с СВЧ-генератором 2 через блок управления 9 и блок питания СВЧ-источника 10.

К микропроцессору 8 через его порт (адаптер ввода-вывода) 11 вводятся исходные данные ( $T$ ,  $V$ ,  $q$ ). Датчик положения 12 термодатчика 3 определяет расстояние между точечным источником тепла 2 и термодатчиком 3, и через

АЦП 13 передает данные в микропроцессор 8. Блок управления реверсивным двигателем 14 координируется микропроцессором 8 и подключен к блоку питания 15, который подключен к реверсивному двигателю 16, выход которого в свою очередь соединен с механизмом перемещения 17 термодатчика 3 относительно теплового источника 2 по оси  $x$ . Перемещение всего информационного зонда ИИС, состоящего из точечного источника тепла 2 и термодатчика 3, над поверхностью исследуемых материалов с заданной скоростью  $V$  осуществляется двигателем постоянного тока 18 через механизм перемещения 19, который кинематически связан с измерительным зондом. Управление работой двигателя 18 осуществляется микропроцессором 8 через блок управления двигателем 20 и блок питания двигателя постоянного тока 21. Микропроцессор 8 выводит экспериментальные данные на индикатор (монитор) 22.

Информационно-измерительная система реализует разработанный бесконтактный метод НК ТФС искомых материалов следующим образом. Включают источник тепла 2 и начинают его перемещение вместе с термодатчиком 3 над исследуемым образцом 1 с постоянной скоростью  $V$ . Термодатчик 3, движущийся при этом на линии перемещения пятна нагрева источника теплоты с некоторым отставанием от него, фиксирует избыточную температуру нагреваемой поверхности, соответствующую установившемуся квазистационарному режиму нагрева. Затем постепенно изменяют расстояние отставания точки контроля избыточной установившейся температуры от точки подвода теплоты, величина которой устанавливается таким образом, чтобы с помощью используемой контрольно-измерительной аппаратуры ее можно было бы измерить с заданной погрешностью. Разностный сигнал  $\Delta T$ , который фиксируется в микроконтроллере 8, дает сигнал через блок управления 20 и блок питания 21 на реверсивный двигатель 18, который в зависимости от знака и величины рассогласования перемещает в ту или иную сторону (в сторону уменьшения или увеличения расстояния между термодатчиком и источником) термодатчик 3 относительно источника тепла 2.

Изменение расстояния (перемещение термодатчика) между точкой измерения температуры и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура поверхности исследуемого образца станет равной заданному значению  $T_{\text{зад}}$ . При этом датчик положения 12 фиксирует установившееся расстояние между точкой подвода теплоты 5 и бесконтактным термодатчиком 3, и через АЦП 13 значение заносится в оперативную память микропроцессора 8. Затем перемещают термодатчик 3 на линию движения  $B$ , параллельную линии движения источника и смещенную от нее на расстояние  $y_1$ , и повторяют вышеописанные измерительные процедуры.

При этом информация об установившемся расстоянии  $R_x$  между точкой измерения температуры и точкой подвода теплоты фиксируется датчиком положения 12 и через АЦП 13 заносится в оперативную память микропроцессора 8. Затем по заложенной в микропроцессоре программе на основе полученной измерительной информации осуществляется расчет теплофизических характеристик по алгоритму, построенному в соответствии с формулами (4) и (8).

Для проверки работоспособности предложенного метода проведены эксперименты на полуограниченном в тепловом отношении образцах из силикатного кирпича, красного кирпича и керамзитобетона. Нагрев образцов осуществлялся при температуре окружающей среды  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Скорость движения зонда составляет  $V = 0,005$  м/с. Частота СВЧ-излучения, определяемая по соотношению (1) для каждого из материалов, составляет 4, 3,8 и 4,5 ГГц соответственно. Мощность излучения 300 и 330 Вт. Измерение температуры осуществлялось инфракрасным термометром Optris CSlaser LT, позволяющим проводить измерения



Таблица 2

Определение ТФС теплоизоляционных строительных материалов

Номер эксперимента	$V$ , м/с	$q$ , Вт	$x$ , м	Данные, полученные на основе предлагаемого метода		Данные, полученные известными методами		Уменьшение погрешностей в предложенном методе	
				$a \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\Delta a$ , %	$\Delta \lambda$ , %
Силикатный кирпич									
1	0,005	500	0,018	0,553	0,748	0,569	0,729	4,89	3,74
2	0,004		0,012	0,548	0,746	0,542	0,709	4,79	4,46
3	0,003		0,009	0,544	0,733	0,575	0,714	3,50	3,66
4	0,005	1000	0,016	0,564	0,716	0,587	0,731	5,07	4,41
5	0,006		0,020	0,562	0,710	0,533	0,692	3,72	4,13
Красный кирпич									
1	0,005	500	0,016	0,367	0,665	0,356	0,628	4,38	4,22
2	0,004		0,012	0,379	0,663	0,372	0,661	3,93	3,91
3	0,003		0,008	0,365	0,669	0,372	0,647	3,83	3,82
4	0,005	1000	0,014	0,337	0,651	0,364	0,644	4,38	4,13
5	0,006		0,018	0,335	0,652	0,355	0,641	3,93	5,06
Керамзитобетон									
1	0,005	500	0,016	0,296	0,573	0,301	0,598	5,42	5,28
2	0,004		0,012	0,292	0,570	0,299	0,595	5,65	4,66
3	0,003		0,008	0,294	0,574	0,265	0,599	3,89	4,73
4	0,005	1000	0,014	0,276	0,544	0,267	0,526	3,71	4,43
5	0,006		0,018	0,271	0,582	0,270	0,529	4,42	4,51

температуры в диапазоне от –30 до +1000 °С при температуре окружающей среды от –20 до +85 °С с погрешностью 0,5 %. Полученные в ходе экспериментов данные представлены в табл. 2. Для оценки погрешности метода приведены данные известных методов по исследуемым материалам.

Заключение

Результаты теплофизического эксперимента показывают работоспособность предложенного метода, новизна которого заключается в следующем:

- 1) высокая мобильность предложенного метода измерения ТФС исследуемого материала позволяет измерить большую площадь исследуемых объектов, что повышает производительность измерений ТФС;
- 2) теоретические и экспериментальные исследования показали, что предложенный метод позволяет скомпенсировать до 90 % неучтенных тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду, что, несомненно, повысит метрологический уровень метода, по сравнению с известными методами неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий;
- 3) проведенная экспериментальная проверка показала, что предложенное техническое решение по сравнению с известными методами позволило на 3 – 6 % повысить точность результатов измерения.

### *Список литературы*

1. Патент № 2530441 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установка для его осуществления : № 2013131702/28 : заявл. 09.07.2013 : опубл. 10.10.2014, бюл. № 28 / Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В.; патентообладатель Фокин В. М.
2. Патент № 2488102 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности твердого тела активным методом теплового неразрушающего контроля : № 2012106323/28 : заявл. 21.02.2012 : опубл. 20.07.2013, бюл. № 20 / Карпов Д. Ф., Павлов М. В., Сеницын А. А., Игонин В. И. ; патентообладатель ВоГТУ.
3. Патент № 2379668 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : № 2008140634/28 : заявл. 13.10.2008 : опубл. 20.01.2010, бюл. № 2 / Игонин В. И., Карпов Д. Ф. ; патентообладатель ВоГТУ.
4. Патент № 2328725 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : № 2006140757/28 : заявл. 17.11.2006 : опубл. 10.07.2008, бюл. № 19. / Жуков Н. П., Майникова Н. Ф., Рогов И. В., Чех А. С., Никулин С. С. ; патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ».
5. Пюшнер, Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер ; пер. с англ. Э. Я. Пастрона. – Москва : Энергия, 1968. – 312 с.
6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.
7. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник: в 2 кн. Кн. 2 / И. С. Вайншток, В. Г. Герасимов, А. К. Гурвич [и др.] ; под ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 1976. – 326 с.
8. Чернышов, В. Н. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. – Санкт-Петербург : Экспертные решения, 2016. – 384 с.
9. Чернышов, А. В. Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов / А. В. Чернышов // Тр. ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 16. – С. 63 – 67.
10. Удалова, А. П. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева в реальных условиях эксплуатации изделий / А. П. Удалова, В. Н. Чернышов // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 11. – С. 58 – 63. doi 10.14489/td.2021.11.pp.058-063
11. Удалова, А. П. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева и его метрологический анализ / А. П. Удалова, В. Н. Чернышов // Теплофизика и информационные технологии : материалы Двенадцатой Международной теплофизической школы, Тамбов, 19–20 октября, 2021 г. – Тамбов, 2021. – С. 246 – 249.
12. Удалова, А. П. Неразрушающий микроволновый метод контроля теплофизических характеристик многослойных конструкций с метрологическим анализом / А. П. Удалова, А. В. Чернышов // Теплофизика и информационные технологии : материалы Двенадцатой Международной теплофизической школы, Тамбов, 19–20 октября, 2021 г. – Тамбов, 2021. – С. 250 – 254.

13. Мордасов, С. А. Контроль теплофизических характеристик строительных материалов адаптивным методом с использованием СВЧ-нагрева / С. А. Мордасов, А. П. Негуляева, В. Н. Чернышов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86, № 2. – С. 30 – 36. doi: 10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36

---

## **The Microwave Method and its System of Non-Destructive Testing of Heat-Protective Properties of Building Materials and Products**

**D. Yu. Ostroukhov<sup>1</sup>**✉, **T. I. Chernyshova<sup>2</sup>**, **V. N. Chernyshov<sup>1</sup>**

*Department of Criminal Law and Applied Computer Science in Jurisprudence (1),  
Denistambov359@gmail.com; Department of Design of Radioelectronic  
and Microprocessor Systems (2), TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** adaptive information-measuring system; error source analysis; mobile microwave heat source; thermal conductivity and diffusivity; heat losses from radiant and convective heat exchange.

**Abstract:** A method and a measuring and control system for determining the thermophysical characteristics (heat and thermal conductivity) of materials and finished products under non-contact thermal action from a movable point microwave heat source on the objects under study are proposed. A distinctive feature of the proposed method is to compensate for the effect of heat losses from the surface of the object under study into the environment from radiant and convective heat exchange on the measurement results by adaptively searching for control points for the measured temperature on the surface of the products under study, in which the unaccounted-for heat losses to the environment are equal to each other and compensated.

### *References*

1. Fokin V.M., Kovylin A.V., Popova A.V. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov i ustanovka dlya yego osushchestvleniya* [A method of non-destructive testing of a complex of thermophysical characteristics of solid building materials and an installation for its implementation], Russian Federation, 2014, Pat. 2530441 (In Russ.).
2. Karpov D.F., Pavlov M.V., Sinitsyn A.A., Igonin V.I. *Sposob opredeleniya teploprovodnosti tverdogo tela aktivnym metodom teplovogo nerazrushayushchego kontrolya* [Method for determining the thermal conductivity of a solid by the active method of thermal non-destructive testing], Russian Federation, 2013, Pat. 2488102 (In Russ.).
3. Igonin V.I., Karpov D.F. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov i izdeliy* [Method of non-destructive testing of thermophysical characteristics of building materials and products], Russian Federation, 2010, Pat. 2379668 (In Russ.).
4. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Chekh A.S., Nikulin S.S. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov i izdeliy* [Method of non-destructive testing of thermophysical characteristics of building materials and products], Russian Federation, 2008, Pat. 2328725 (In Russ.).

5. Pyushner G. *Nagrev energiyey sverkhvysokikh chastot* [Heating by the energy of ultrahigh frequencies], Moscow: Energiya, 1968, 312 p. (In Russ.)
6. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.)
7. Vainshtok I.S., Gerasimov V.G., Gurvich A.K. [et al.]; Klyuev V.V. (Ed.). *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy: spravochnik* [Devices for non-destructive testing of materials and products]: in 2 books; Book 2, Moscow: Mashinostroenie, 1976, 326 p. (In Russ.)
8. Chernyshov V.N., Chernyshova T.I. *Metody i informatsionno-izmeritel'nyye sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy* [Methods and information and measuring systems for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products], St. Petersburg: Ekspertnyye resheniya, 2016, 384 p. (In Russ.)
9. Chernyshov A.V. *Trudy TGTU: sbornik nauchnykh statei molodykh uchenykh i studentov* [Proceedings of TGTU: collection of scientific articles by young scientists and students], Tambov, 2004. Issue 16, pp. 63-67. (In Russ.)
10. Udalova A.P., Chernyshov V.N. [Method of non-destructive testing of thermophysical characteristics of materials and products using microwave heating under real operating conditions of products], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2021, vol. 24, no. 11, pp. 58-63. doi: 10.14489/td.2021.11.pp.058-063 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Udalova A.P., Chernyshov V.N. *Teplofizika i informatsionnyye tekhnologii: materialy Dvenadtsatoy Mezhdunarodnoy teplofizicheskoy shkoly* [Thermophysics and Information Technologies: Proceedings of the Twelfth International School of Thermophysics], Tambov, 19-20 October, 2021, Tambov, 2021, pp. 246-249. (In Russ.)
12. Udalova A.P., Chernyshov A.V. *Teplofizika i informatsionnyye tekhnologii: materialy Dvenadtsatoy Mezhdunarodnoy teplofizicheskoy shkoly* [Thermophysics and Information Technologies : proceedings of the Twelfth International School of Thermophysics], Tambov, 19-20 October, 2021, Tambov, 2021, pp. 250-254. (In Russ.)
13. Mordasov S.A., Negulyaeva A.P., Chernyshov V.N. [Control of thermophysical characteristics of building materials by an adaptive method using microwave heating], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Diagnostics of materials], 2020, vol. 86, no. 2, pp. 30-36. doi: 10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Mikrowellenverfahren und das zugehörige System zur zerstörungsfreien Prüfung der Wärmeschutzeigenschaften von Baumaterialien und Bauprodukten**

**Zusammenfassung:** Es sind ein Verfahren und ein zugehöriges Mess- und Regelsystem zur Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften (Temperatur und Temperaturleitfähigkeit) von Werkstoffen und Fertigprodukten unter berührungsloser thermischer Einwirkung einer beweglichen Mikrowellen-Punktwärmequelle auf die Prüfobjekte vorgestellt. Das Verfahren zeichnet sich durch die Kompensation des Einflusses von Wärmeverlusten der Prüfobjektoberfläche in die Umgebung aufgrund von Strahlungs- und Konvektionswärmeaustausch auf die Messergebnisse aus. Dies geschieht durch eine adaptive Suche nach Kontrollpunkten der gemessenen Temperatur auf der Prüfobjektoberfläche, an denen die nicht berücksichtigten Wärmeverluste in die Umgebung gleich groß sind und kompensiert werden.

## **Méthode à micro-ondes et système de contrôle non destructif des propriétés de protection thermique des matériaux et des produits de construction**

**Résumé:** Sont proposés la méthode et le système de mesure et de contrôle de la détermination des caractéristiques thermiques (chaleur- et conductivité thermique) des matériaux et des produits finis sous l'effet thermique sans contact d'une source de chaleur micro-ondes ponctuelle mobile sur les objets en question. Il est à noter que la caractéristique distinctive de la méthode proposée est la compensation de l'influence des pertes thermiques de la surface de l'objet étudié dans l'environnement de l'échange de chaleur radiante et convective sur les résultats de mesure en recherchant de manière adaptative les points de contrôle de la température mesurée à la surface des produits étudiés, dans lesquels les pertes thermiques non comptabilisées dans l'environnement sont égales entre elles et compensées.

---

**Авторы:** *Остроухов Денис Юрьевич* – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Уголовное право и и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

П. В. Балабанов<sup>1</sup>, А. С. Егоров<sup>2</sup>, С. А. Сенкевич<sup>2✉</sup>,  
А. Д. Миронов<sup>1</sup>, В. О. Буланова<sup>2</sup>, Д. А. Бобров<sup>2</sup>, В. А. Бугров<sup>2</sup>

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения» (1),  
НИИЛ «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы»  
Управления фундаментальных и прикладных исследований (2),  
thegreatarchitect1424@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** мобильные робототехнические платформы; моделирование; модели управления электроприводами; регулятор; система автоматического управления.

**Аннотация:** Представлен обзор используемых в сельском хозяйстве мобильных робототехнических платформ и моделей управления их электроприводами. Проведено моделирование электропривода постоянного тока. Получены оптимальные настройки параметров системы управления электроприводом. Разработана модель перемещения платформы на плоскости и показан алгоритм управления ею, обеспечивающий заданную траекторию движения.

---

### Введение

Сельское хозяйство сталкивается с необходимостью повышения эффективности производства и качества растительной продукции. Традиционные методы мониторинга состояния растений трудоемки, ресурсоемки, часто не обеспечивают достаточной точности. В ответ на эти вызовы активно развиваются технологии точного земледелия, в том числе использование робототехнических платформ для автоматизированного мониторинга.

Данная статья посвящена разработке системы управления мобильной робототехнической платформой, предназначенной для проксимального зондирования растений.

*Цель работы* – определение оптимальных параметров (настроек) системы управления, обеспечивающей позиционирование платформы на местности. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1) обзор существующих мобильных робототехнических платформ в сельском хозяйстве и анализ моделей управления их электроприводами;
- 2) моделирование системы управления электроприводами платформы;
- 3) разработка модели пространственного перемещения платформы и алгоритма управления, обеспечивающего заданную траекторию движения.

Результаты проведенного исследования позволяют оценить эффективность разработанной системы управления и ее потенциал применительно к задачам проксимального зондирования растений. Статья содержит описание используемых методов, полученных результатов моделирования и экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность представленной системы.



## Обзор существующих робототехнических платформ и систем управления электроприводами

Робототехнические платформы для механической и химической прополки сорняков представлены следующими типами: HortiBot, Aarhus University (Дания) [1], Vitirover, NaïoTechnologies (Франция) [2], EcoRobotix (Швейцария), BoniRob (Deep field Robotics, Германия) [3], FarmWise (США), AgBot II, Digital Farmhand (Австралия), FarmDroid (Германия). По утверждению исследователей и разработчиков, эффективность механической прополки средствами робоплатформ достигает 90 %, а обработка гербицидами – 100 % благодаря точному нацеливанию на сорняки с применением системы Drop-on-Demand (DoD) [4]. Следует отметить, что для существующих робототехнических платформ мало сведений о фактической производительности и адаптируемости для культур с другими эксплуатационными требованиями. Для расширения сферы коммерческого использования таких робоплатформ требуется увеличение их рабочей скорости и производительности, площади обрабатываемой поверхности, а также повышение точности обнаружения сорняков.

Ряд исследований посвящены робототехническим технологиям обнаружения и идентификации болезней [5], а также насекомых-вредителей [6]. Исследователями предложены модели сверточной нейронной сети для множественной классификации насекомых, а также методы грубого обнаружения и подсчета YOLO (You Only Look Once), методы классификации и точного подсчета на основе SVM (Support Vector Machines) с использованием глобальных функций. Предложенные алгоритмы позволили детектировать симптомы мучнистой росы, вируса пятнистого увядания томатов, поражения бактерией *Xylella fastidiosa* и др.

Для фенотипирования посевов сахарной свеклы разработана автономная робототехническая платформа (Bernard, Франция), включающая колесный мобильный робот и манипулятор с шестью степенями свободы для колориметрических и геометрических измерений растений. Университетом Карнеги–Меллона разработана робототехническая наземная платформа высокопроизводительного фенотипирования пропашных культур сорго и кукурузы. Полностью автоматизированная платформа для фенотипирования (Rothamsted Research, Великобритания) включает в себя RGB-камеры высокого разрешения, а также камеры, детектирующие яркость флуоресценции хлорофилла и тепловизионные инфракрасные камеры, два гиперспектрометра и два лидара.

Создан ряд коммерчески доступных автономных и полуавтономных робототехнических платформ для сбора различных плодов (табл. 1).

Можно выделить *два основных подхода* к управлению робототехническими платформами.

*Первый* подход использует камеры и алгоритмы компьютерного зрения для восприятия окружающей среды. Робототехническая платформа анализирует изображения в реальном времени, чтобы определять свое положение, обнаруживать препятствия, распознавать объекты и следовать по заданной траектории. Преимущества включают возможность работы в динамичных и неструктурированных средах, а также адаптацию к меняющимся условиям. Однако такой подход зависит от качества освещения, может быть чувствителен к помехам и требует значительных вычислительных ресурсов для обработки изображений.

*Второй* подход базируется на использовании инерциальных измерительных блоков (IMU), которые регистрируют ускорение и угловую скорость платформы. На основе этих данных, с применением алгоритмов интеграции, вычисляется текущее положение и ориентация робота. Инерциальное управление обеспечивает автономность и независимость от внешних сенсоров, а также высокую точность при перемещении на короткие расстояния.

Таблица 1

**Список коммерчески доступных автономных  
и полуавтономных робототехнических платформ**

Продукт	Производитель робототехнической платформы	Страна
Яблоки	Abundant Robotics	США
	FF Robotics	Израиль
Клубника	Dogtooth Technologies	Великобритания
	Rubion Octinio	Бельгия
	Thorvald II	Норвегия
	Agrobot SW 6010	Испания
Сладкий перец	Sweeper	Нидерланды
Спаржа	Cerescon	Нидерланды
Томаты	Metomotion	Израиль
	Root-AI	США
Апельсины	Energid	США
	Agribot	Испания
Огурцы	VanHenten	Нидерланды
Баклажаны	Hayashi	Япония
Арбузы	Umeda	Япония
Грибы	Agaricus bisporus	Великобритания

В рамках данной статьи необходимо построить модель пространственного перемещения платформы и алгоритм управления ею.

При разработке или изучении алгоритмов нелинейного управления возникает сложность: их анализ возможен только в динамике и при взаимодействии с внешней средой. Использование реального объекта на ранних этапах проблематично, поэтому применяется компьютерное моделирование. Для корректности моделирования важно правильно ставить задачи. В данной работе рассматривается задача, к которой предъявляются требования наглядности и простоты для интуитивного понимания методологии без сложных вычислений.

Для моделирования системы управления платформой выбран отечественный программный продукт SimInTech (Simulation In Technic, моделирование в технических устройствах) компании ООО «3В Сервис». В отличие от иных средств симуляции математических моделей он обладает встроенным блоком «Оптимизатор». Данный блок позволяет определить тип регулятора и с заданной точностью параметры (составляющие) регулятора, которые обеспечивают наилучшее качество переходных процессов регулирования. Примеры подобных расчетов различных типов двигателей рассмотрены в работах [7 – 15].

**Технические компоненты колесной робототехнической платформы**

Общий вид разработанной платформы представлен на рис. 1. Особенностью платформы является мобильность и возможность использования устройств, которые можно на нее установить с целью мониторинга качества растительной продукции и растений в сельском хозяйстве.



Рис. 1. Колесная робототехническая платформа

Электродвигатели, вращающие колеса данной платформы посредством зубчатой передачи, позволяют осуществлять ее передвижение в разных направлениях. Повышенная проходимость позволяет использовать платформу не только на твердом грунте, например в теплицах, но и на грунтовых дорогах, например, в междурядье плодовых садов. Управление передвижением платформы осуществляется в автономном режиме и с пульта управления.

Автономный режим подразумевает автоматическое передвижение, которое контролируется промышленным компьютером, установленным внутри платформы. Структурная схема системы управления движением платформы представлена на рис. 2.

Колесная робототехническая платформа имеет возможность передвигаться автономно, при помощи программы, стереометрической камеры ZED2i и датчиков (US Sensors), а также при помощи пульта управления (RC transmitter). Переключение между режимами осуществляет реле (Relay). Управление электродвигателями (M1, M2) выполняет контроллер (VESC controller).

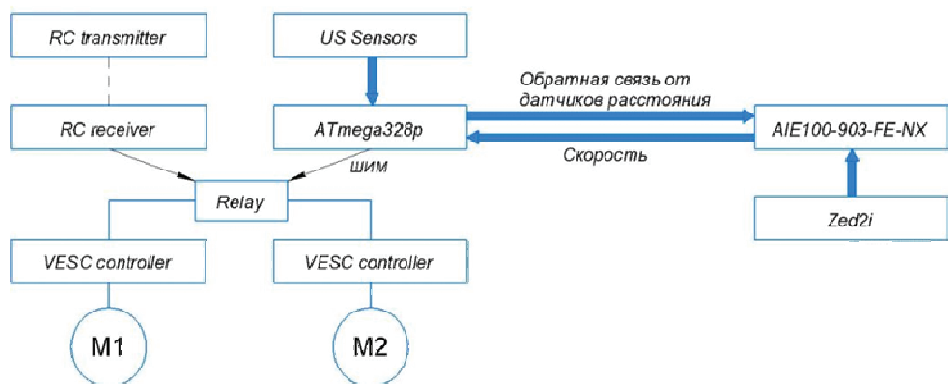


Рис. 2. Структурная схема системы управления движением платформы

Пульт управления посылает сигнал на приемник (RC receiver), который в свою очередь посылает сигнал на реле, тем самым переключает сигнал на управление колесной робототехнической платформой с пульта управления. В случае автономного перемещения, управление VESC-контроллерами выполняет промышленный компьютер (AIE100-903-FE-NX). Сигнал с компьютера поступает на ШИМ-контроллер (ATmega328p), после чего реле (Relay) переключает управление с пульта управления на компьютер. Компьютер получает информацию со стереометрической камеры ZED2i, установленной на платформе, а также сенсорных датчиков (US Sensors). Полученные данные с датчиков способствуют безопасному передвижению колесной робототехнической платформы. Непосредственно электродвигателем управляет VESC-контроллер.

Для повышения автономности платформы необходимо решить задачи разработки алгоритмов ее управления, прежде всего приводами платформы.

### Моделирование системы управления приводами платформы

Упрощенная электрическая принципиальная схема системы управления приводом платформы показана на рис. 3 [16]. Модуль обеспечивает управление угловой скоростью вращения вала двигателя постоянного тока (ДПТ) в соответствии с заданным цифровым сигналом  $\tilde{U}_0$ , который формируется программными средствами в микроконтроллере (МК). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) кодирует аналоговые сигналы обратной связи  $U_1$  в цифровой сигнал  $\tilde{U}_1$ , который поступает на вход МК; на другой его вход подается цифровой задающий сигнал  $\tilde{U}_0$ ; в МК выполняются операции вычисления сигнала рассогласования и предписанного алгоритма управления; выходная величина микроконтроллера  $\tilde{U}_2$  в двоичном коде подается на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), который преобразует цифровую величину  $\tilde{U}_2$  в аналоговое значение напряжения  $U_2$ . Затем этот сигнал поступает на усилитель (У), обозначенный на схеме как  $U_3$ , после чего значение  $U_3$  подается на силовой преобразователь (СП), который в зависимости от величины  $U_3$  формирует напряжение на якоре ДПТ  $U_{\text{я}}$ . От значения  $U_{\text{я}}$  зависит значение угловой скорости на валу ДПТ, которая передается на вал рабочего органа (РО) помощью редуктора (Р). Датчик угловой скорости вращения вала двигателя (ДС) регистрирует ее значения, которые преобразует в аналоговый сигнал напряжения  $U_{\text{ДС}}$ .

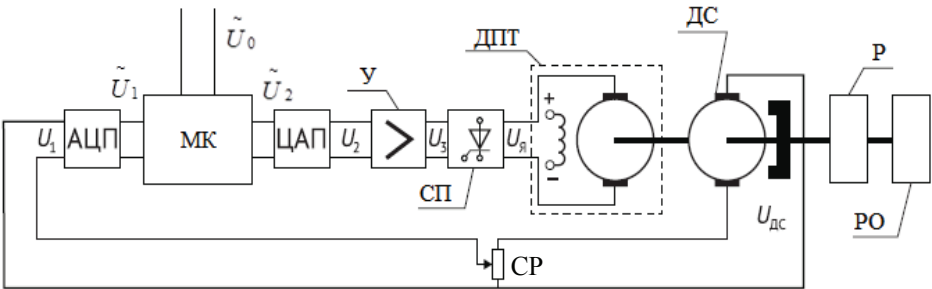


Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема системы управления приводом [16]

Сигнал  $U_{ДС}$  подключен к АЦП через согласующий резистор СР, преобразующий сигнал  $U_{ДС}$  во входной сигнал обратной связи АЦП  $U_1$ .

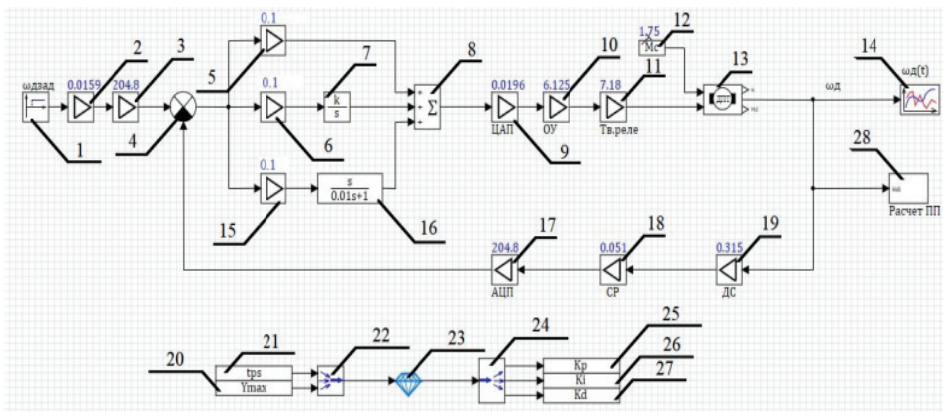
При моделировании ДПТ использована система уравнений [16]:

$$U_{я} = L_{я} \frac{dI}{dt} + R_{я} I + E_{я}; \quad J \frac{d\omega_{Д}}{dt} = M - M_{с},$$

где  $U_{я}$  – напряжение в цепи якоря;  $L_{я}$  – индуктивность якоря;  $I$  – сила тока в цепи якоря;  $t$  – время;  $R_{я}$  – сопротивление обмоток якоря;  $E_{я}$  – обратная электродвижущая сила в цепи якоря;  $J$  – эквивалентный момент инерции модуля движения, приведенный к валу ДПТ;  $\omega_{Д}$  – угловая скорость вращения вала ДПТ;  $M$  – крутящий момент на валу ДПТ;  $M_{с}$  – постоянный момент сопротивления, эквивалентный номинальному крутящему моменту ДПТ;  $\phi_{Д}$  – угол поворота вала ДПТ;  $k_e, k_M$  – коэффициент противоЭДС и моментный коэффициент соответственно, определяемые из выражений  $E_{я} = k_e \omega_{Д}$ ,  $M = k_M I$ .

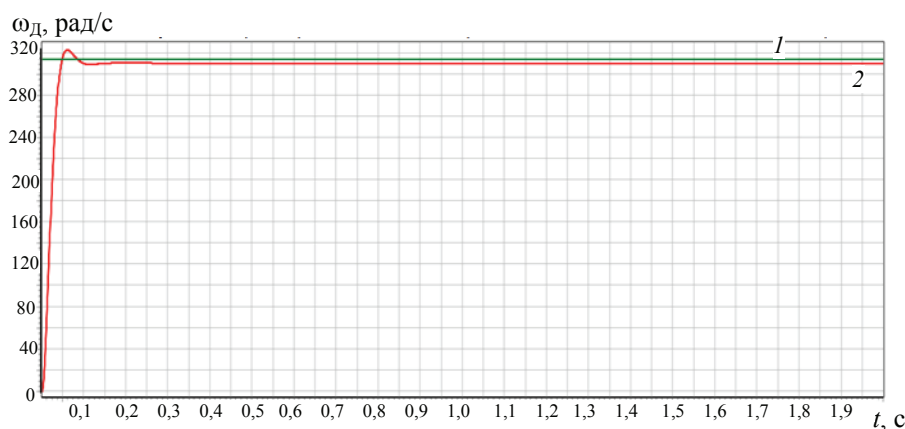
Для реализации модели системы управления (рис. 4) электроприводом использован программный продукт SimInTech 64, с помощью которого найдены оптимальные настройки системы управления электроприводом.

Результатом моделирования являются полученные оптимальные значения параметров регулятора: пропорциональной  $K_p = 0,549$ , интегральной  $K_i = 11,725$  и дифференциальной  $K_d = 0,008$  составляющих, обеспечивающие характеристики переходного процесса в электроприводе, характеризуемые графиком на рис. 5.



**Рис. 4. Модель системы регулирования одного из двух двигателей платформы с использованием ПИД-регулятора:**

1 – входное задающее значение угловой скорости вращения  $\omega_{зад}$ ; 2, 3 – усилители; 4 – сумматор; 5, 6, 15 – значения пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих регулятора; 7 – интегратор; 8 – сумматор; 9 – ЦАП; 10 – значение пропорционального коэффициента усиления ДПТ; 11 – передаточный коэффициент управляющего реле; 12 – значение момента сопротивления  $M_{с}$ ; 13 – ДПТ; 14 – осциллограф; 16 – передаточная функция дифференциальной составляющей ПИД-регулятора; 17 – АЦП; 18 – согласующий резистор СР; 19 – датчик угловой скорости вращения вала двигателя ДС; 20, 21 – блок чтения сигналов времени  $t_{ps}$  и максимального значения при регулировании  $Y_{max}$ ; 22 – мультиплексор; 23 – оптимизатор; 24 – демultipлексор; 25 – 27 – запись оптимизированных значений П, И и Д составляющих регулятора; 28 – блок расчета параметров переходного процесса



**Рис. 5. График переходного процесса модели, включающей двигатель и ПИД-регулятор:**  
1 –  $\omega_D(t)$ ; 2 –  $\omega_{D\text{ зад}}(t)$

### Моделирование пространственного перемещения платформы и алгоритма управления, обеспечивающего заданную траекторию движения

Для моделирования пространственного перемещения платформы модель управления электроприводом дополнена моделью пространственного положения, основанной на системе уравнений [17]:

$$\begin{cases} V_x = (r w_1 + a \theta) \sin \theta; \\ V_y = (r w_2 + a \theta) \cos \theta; \\ \theta = \frac{r w_2 - r w_1}{2a}, \end{cases}$$

где  $V_x$  и  $V_y$  – скорости платформы вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно, причем ось  $y$  направлена от центра масс платформы в сторону ее передней части, то есть по ходу движения, а ось  $x$  – вправо от центра масс;  $w_1$  и  $w_2$  – угловые скорости вращения колес платформы, полученные путем приведения угловых скоростей вращения выходных валов двигателей с помощью коэффициента передачи двух последовательных цепных передач

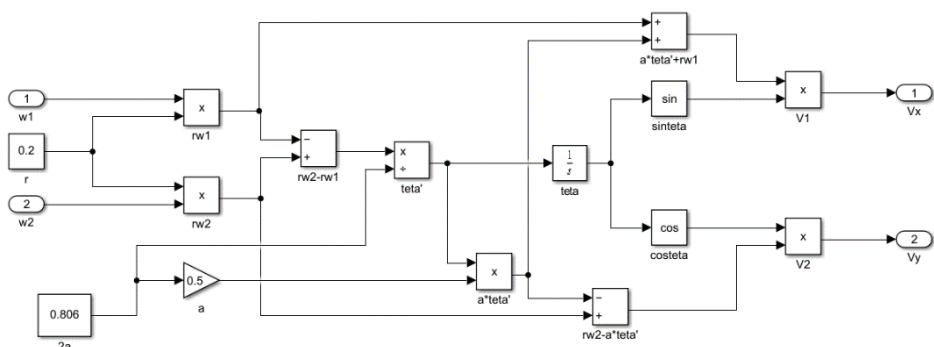
$k_{\text{цеп}} = \frac{1}{8,5} = 0,118$ , рассчитанного как произведение

двух отношений (между валами двигателя и колес установлено последовательно две цепные передачи) количества зубьев на ведомой звездочке к количеству на ведущей;  $\theta$  – текущий угол между положительным направлением оси  $x$  и направлением прямого движения платформы;  $r$  – радиус колеса платформы;  $2a$  – расстояние между центральными осями левых и правых колес платформы.

На рисунке 6 показана структурная модель, выполненная в программе SimInTech, входными сигналами которой являются угловые скорости  $w_1$  и  $w_2$  вращения колес платформы. Выходные параметры модели – линейные скорости  $V_x$  и  $V_y$  перемещения платформы вдоль осей  $x$ ,  $y$  соответственно, а также координаты положения платформы.

Указанная модель позволила разработать алгоритм управления, включающий операции:





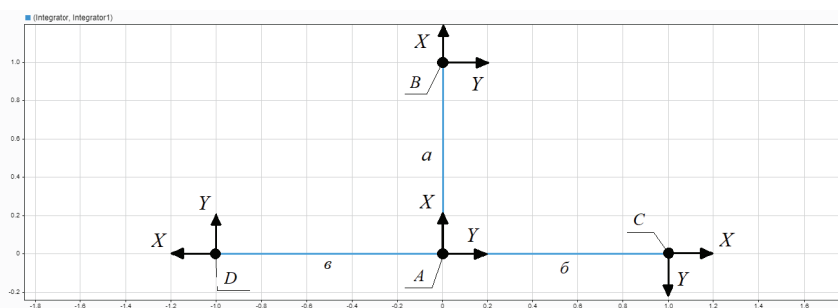
**Рис. 6. Модель пространственного перемещения платформы**

- поворот платформы на заданный угол, необходимый для достижения конечной точки пути;
- прямолинейное движение от стартовой до конечной точки.

Пример реализации алгоритма представлен на рис. 7. В начальный момент времени центр масс (ЦМ) платформы находится в точке  $A$  с координатами  $(0; 0)$ , система координат платформы –  $XY$  показана стрелками на рис. 7. При движении из точки  $A$  в точку  $B$  с координатами  $(0; 1)$  угол поворота платформы  $\theta = 0$ , а прямолинейное перемещение составляет  $S = 1$  м. Согласно полученным результатам моделирования, для перемещения в указанную точку длительность импульсов управляющих сигналов, подаваемых на электроприводы, должна составлять  $\tau = 3,53$  с при амплитуде  $+12$  В.

Для задания необходимого угла поворота требуется подавать на двигатели сигналы разной полярности амплитудой  $-12$  В и  $+12$  В. Для поворота на угол  $\theta = 90^\circ$  по часовой стрелке необходимо подавать сигнал  $+12$  В на двигатель, приводящий в движение колеса с левой стороны платформы, и  $-12$  В – с правой. Длительность импульса должна составлять  $\tau = 2,235$  с. Это обеспечивает перемещение платформы по траектории движения  $b$  из точки  $A$  с координатами  $(0; 0)$  в точку  $C$  с координатами  $(1; 0)$ .

Для поворота платформы против часовой стрелки полярность управляющих сигналов необходимо инвертировать и в течение времени  $\tau = 2,235$  с подавать сигнал  $+12$  В на правый двигатель и  $-12$  В – на левый. Примером реализации движения с предварительным поворотом платформы на угол  $\theta = -90^\circ$ , то есть против часовой стрелки, является движение по траектории из начальной точки  $A$  с координатами  $(0; 0)$  в конечную точку  $D$  с координатами  $(-1; 0)$ .



**Рис. 7. Траектории движения платформы:**

$A(0; 0)$  – начальное положение ЦМ платформы;  
 $B(0; 1)$ ;  $C(1; 0)$ ;  $D(-1; 0)$  – конечные положения ЦМ платформы после движения по траекториям  $a - c$  соответственно;  $XY$  – система координат платформы



## Заключение

Таким образом, проведен обзор используемых в сельском хозяйстве мобильных робототехнических платформ и моделей управления их электроприводами. Выделены два основных подхода к управлению робототехническими платформами. Выбрана инерционная модель благодаря автономности и независимости от внешних сенсоров. Данный подход позволяет платформе ориентироваться даже в условиях недостаточной освещенности. Проведено моделирование работы выбранного двигателя постоянного тока. Аналитическим методом рассчитаны составляющие ПИД-регулятора для управления работой выбранного двигателя и осуществлен синтез такого регулятора. Построена модель пространственного перемещения платформы и представлен алгоритм управления ею, обеспечивающий заданную траекторию движения.

Проведенные исследования применимы для перемещения роботизированной платформы в теплицах и на складах. Робототехническая платформа при перемещении по пересеченной местности сталкивается с такими проблемами, как сильные вибрации и пониженная энергоэффективность, загрязнения. Предметом дальнейших разработок является совершенствование модели для снижения требований к качеству дорожного покрытия в местах применения платформы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Разработка роботизированного комплекса наземной и воздушной беспилотных платформ для применения в агротехнологиях» (ЕГИСУ НИОКТР: 124062100023-3).*

## Список литературы

1. HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing / R. N. Jørgensen, C. G. Sørensen, J. Maagaard, I. Havn, K. Jensen, H. T. Søgaard, L. B. Sørensen. – Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript ATOE 07 006. Vol. IX. July, 2007. – URL : <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/c3b6b8af-aaa5-4ac5-a62e-b5624b432fab/content> (дата обращения: 16.06.2025).
2. Vineyard Vigilant & INNovative Ecological Rover (VVINNER): an autonomous robot for automated scoring of vineyards / B. Keresztes, C. Germain, J.-P. Da Costa, G. Grenier, X. D. Beaulieu // Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, 06–10 July 2014. – URL : <https://geyseco.es/geystiona/adjs/comunicaciones/304/C04230001.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).
3. Navigation System of the Autonomous Agricultural Robot “BoniRob” / P. Biber, U. Weiss, M. Dorna, A. Albert // Workshop on Agricultural Robotics: Enabling Safe, Efficient, and Affordable Robots for Food Production (Collocated with IROS 2012), Vilamoura, Portugal. – 2012. – Vol. 10. – URL: <https://www.cs.cmu.edu/~mberger/agrobotics2012/01Biber.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).
4. Robotic in-row weed control in vegetables / T. Utstumo, F. Urdal, A. Brevik, J. Dørum, J. Netland [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Vol. 154. – P. 36 – 45. doi: 10.1016/j.compag.2018.08.043
5. Ampatzidis, Y. iPathology: Robotic Applications and Management of Plants and Plant Diseases / Y. Ampatzidis, L. De Bellis, A. Luvisi // Sustainability (Switzerland). – 2017. – Vol. 9, No. 6. doi: 10.3390/su9061010 – URL :

<https://scispace.com/pdf/ipathology-robotic-applications-and-management-of-plants-and-m5o620q9fa.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).

6. Liu, H. Proximal detecting invertebrate pests on crops using a deep residual convolutional neural network trained by virtual images / H. Liu, J. S. Chahl // *Artificial Intelligence in Agriculture*. – 2021. – Vol. 5, No. 5. – P. 13 – 23. doi: 10.1016/j.aiia.2021.01.003

7. Božek, P. The development of an optimally-tuned PID control for the actuator of a transport robot / P. Božek, Y. Nikitin // *Actuators*. – 2021. – Vol. 10, No. 8. – P. 195. doi 10.3390/act10080195

8. Using the SimInTech dynamic modeling environment to build and check the operation of automation systems / A. A. Abalov, S. V. Nosachev, V. P. Zharov, V. A. Minko // *MATEC Web of Conferences*, Rostov-on-Don, 12–14 Sept. 2018. – Vol. 226. – P. 04003. doi: 10.1051/mateconf/201822604003

9. Афоничев, Д. Н. Особенности моделирования электрических машин в программе SimInTech / Д. Н. Афоничев, С. Н. Пиляев // *Моделирование информационных систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 19–20 мая 2021 года*. – Воронеж, 2021. – С. 340 – 345. doi: 10.34220/MIS340-345

10. Корзников, М. Э. Применение среды динамического моделирования SimInTech для исследования и анализа технических систем / М. Э. Корзников, Е. А. Овчаренко, И. В. Ершова // *Актуальные вопросы инновационного развития арктического региона РФ : сб. ст. V Всерос. науч.-практ. конф., Северодвинск, 20 – 30 ноября 2023 года*. – Северодвинск, 2024. – С. 619 – 623.

11. Синтез ПИД-регуляторов для объектов третьего порядка с запаздыванием: сравнение программ Altair Embed и SimInTech / Н. А. Журавлев, А. И. Уберт, В. Г. Шахтшнейдер, О. П. Русаков // *Автоматика и программная инженерия*. – 2020. – № 2(32). – С. 43 – 50. – URL : [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-2-2020-5\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-2-2020-5_0.pdf) (дата обращения: 16.06.2025).

12. Афоничев, Д. Н. Использование программного комплекса SimInTech для проектирования мехатронных систем / Д. Н. Афоничев, С. Н. Пиляев, С. В. Кузьменко // *Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : материалы нац. науч.-практ. конф., Воронеж, 26–27 ноября 2019 года*. – Воронеж, 2019. – С. 335 – 339.

13. Петуховская, В. Р. Разработка нечеткого регулятора в среде динамического моделирования SimInTech / В. Р. Петуховская, А. С. Александрова // *Химия. Экология. Урбанистика*. – 2020. – Т. 4. – С. 294 – 297.

14. Лыткин, С. В. Исследование возможностей SimInTech для моделирования автоматизированных и мехатронных систем / С. В. Лыткин // *Modern Science*. – 2021. – № 7. – С. 319 – 323.

15. Лекомцев, П. В. Моделирование гибридного шагового двигателя в пространстве состояний при переменном моменте сопротивления нагрузки / П. В. Лекомцев, Ю. Р. Никитин, С. А. Трефилов // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 58 – 63. doi: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63

16. Герман-Галкин, С. Г. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech / С. Г. Герман-Галкин, Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 494 с.

17. Бартенев, В. В. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости / В. В. Бартенев, С. Ф. Яцун, А. С. Аль-Еззи // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 4-1. – С. 288 – 293.

## Simulation of the Control System for a Ground-Based Robotic Platform for Agriculture

P. V. Balabanov<sup>1</sup>, A. S. Egorov<sup>2</sup>, S. A. Senkevich<sup>2</sup>✉,  
A. D. Mironov<sup>1</sup>, V. O. Bulanov<sup>2</sup>, D. A. Bobrov<sup>2</sup>, V. A. Bugrov<sup>2</sup>

*Department of Mechatronics and Technological Measurements (1),  
Research Laboratory "Intelligent unmanned robotic platforms"  
of Department of Fundamental and Applied Research (2),  
thegreatarchitect1424@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** mobile robotic platforms; modeling; electric drive control models; controller; automatic control system.

**Abstract:** The article provides an overview of mobile robotic platforms which are used in agriculture and control models for their electric drives. A simulation of a DC electric drive was carried out; optimal settings were obtained for the parameters of the electric drive control system. A model of moving the platform on a plane was developed, and an algorithm for controlling it was presented, which allows to ensure a given trajectory of movement.

### References

1. Jørgensen R.N., Sørensen C.G., Maagaard J., Havn I., Jensen K., Søgaard H.T., Sørensen L.B. HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript ATOE 07 006, vol. IX, July, 2007, available at: <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/c3b6b8af-aaa5-4ac5-a62e-b5624b432fab/content> (accessed 06 June 2025).
2. Keresztes B., Germain C., Da Costa J.-P., Grenier G., Beaulieu X.D. Vineyard Vigilant & INNovative Ecological Rover (VVINNER): an autonomous robot for automated scoring of vineyards, *Proceedings International Conference of Agricultural Engineering*, Zurich, 06-10 July 2014, available at: <https://geyseco.es/geystional/adjs/comunicaciones/304/C04230001.pdf> (accessed 06 June 2025).
3. Biber P., Weiss U., Dorna M., Albert A. Navigation System of the Autonomous Agricultural Robot "BoniRob", *Workshop on Agricultural Robotics: Enabling Safe, Efficient, and Affordable Robots for Food Production (Collocated with IROS 2012)*, Vilamoura, Portugal, 2012, vol. 10, available at: <https://www.cs.cmu.edu/~mbergerm/agrobotics2012/01Biber.pdf> (accessed 06 June 2025).
4. Utstumo T., Urdal F., Brevik A., Dørum J., Netland J. [et al.], Robotic in-row weed control in vegetables, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 154, pp. 36-45. doi: 10.1016/j.compag.2018.08.043
5. Ampatzidis Y., De Bellis L., Luvisi A. iPathology: Robotic Applications and Management of Plants and Plant Diseases, *Sustainability (Switzerland)*, 2017, vol. 9, no. 6. doi: 10.3390/su9061010, available at: <https://scispace.com/pdf/ipathology-robotic-applications-and-management-of-plants-and-m5o620q9fa.pdf> (accessed 06 June 2025).
6. Liu H., Chahl J.S. Proximal detecting invertebrate pests on crops using a deep residual convolutional neural network trained by virtual images, *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2021, vol. 5, no. 5, pp. 13-23. doi: 10.1016/j.aiia.2021.01.003

7. Božek P., Nikitin Y. The development of an optimally-tuned PID control for the actuator of a transport robot, *Actuators*, 2021, vol. 10, no. 8, pp. 195. doi: 10.3390/act10080195
8. Abalov A.A., Nosachev S.V., Zharov V.P., Minko V.A. Using the SimInTech dynamic modeling environment to build and check the operation of automation systems, *MATEC Web of Conferences*, Rostov-on-Don, 12–14 Sept. 2018, vol. 226, pp. 04003. doi: 10.1051/mateconf/201822604003
9. Afonichev D.N., Pilyayev S.N. *Modelirovaniye informatsionnykh sistem: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modeling of information systems: Proc. Int. scientific-practical. conf.], Voronezh, 19–20 May 2021, Voronezh, 2021, pp. 340–345. doi: 10.34220/MIS340-345 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Korznikov M.E., Ovcharenko Ye.A., Yershova I.V. *Aktual'nyye voprosy innovatsionnogo razvitiya arkticheskogo regiona RF: sb. st. V Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Actual issues of innovative development of the Arctic region of the Russian Federation: Coll. Art. V All-Russian scientific-practical. conf.], Severodvinsk, 20–30 November 2023, Severodvinsk, 2024, pp. 619–623. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Zhuravlev N.A., Ubert A.I., Shakhtshneyder V.G., Rusakov O.P. [Synthesis of PID controllers for third-order objects with delay: comparison of Altair Embed and SimInTech programs], *Avtomatika i programmnaya inzheneriya* [Automation and software engineering], 2020, no. 2(32), pp. 43–50. available at: [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-2-2020-5\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-2-2020-5_0.pdf) (accessed 06 June 2025). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Afonichev D.N., Pilyayev S.N., Kuz'menko S.V. *Nauka i obrazovaniye na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya: materialy nats. nauch.-prakt. konf.* [Science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: materials of the national scientific and practical conf.], Voronezh, 26–27 November 2019, Voronezh, 2019, pp. 335–339. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Petukhovskaya V.R., Aleksandrova A.S. [Development of a fuzzy controller in the SimInTech dynamic modeling environment], *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urban studies], 2020, vol. 4, pp. 294–297. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Lytkin S.V. [Study of SimInTech Capabilities for Modeling Automated and Mechatronic Systems], *Modern Science*, 2021, no. 7, pp. 319–323. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Lekomtsev P.V., Nikitin Yu.R., Trefilov S.A. [Modeling of a Hybrid Stepper Motor in State Space with a Variable Load Resistance Torque], *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Production], 2020, vol. 18, no. 3, pp. 58–63. doi: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63 (In Russ., abstract in Eng.)
16. German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. *Model'noye proyektirovaniye elektromekhanicheskikh mekhatronnykh moduley dvizheniya v srede SimInTech* [Model design of electromechanical mechatronic motion modules in the SimInTech environment], Moscow: DMK Press, 2021, 494 p. (In Russ.)
17. Bartenev V.V., Yatsun S.F., Al'-Yezzi A.S. [Mathematical model of the motion of a mobile robot with two independent driving wheels along a horizontal plane], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 4-1, pp. 288–293. (In Russ., abstract in Eng.)

## Simulation eines Steuerungssystems für eine bodengestützte Roboterplattform für die Landwirtschaft

**Zusammenfassung:** Dieser Artikel bietet einen Überblick über mobile Roboterplattformen in der Landwirtschaft und Regelungsmodelle für deren elektrische Antriebe. Ein Gleichstromantrieb ist simuliert. Optimale Einstellungen für die Parameter des Regelungssystems sind ermittelt. Ein Modell der Plattformbewegung auf der Ebene ist entwickelt und ein Regelungsalgorithmus zur Sicherstellung einer vorgegebenen Trajektorie ist vorgestellt.

---

## Simulation du système de contrôle de plate-forme robotique terrestre pour l'agriculture

**Résumé:** Est présentée une vue d'ensemble des plates-formes robotiques mobiles utilisées dans l'agriculture et des modèles de contrôle de leur alimentation électrique. Est réalisée une simulation d'entraînement électrique à courant continu. Sont optimisés les paramètres du système de commande électrique. Est développé un modèle de déplacement de la plate-forme sur le plan; est montré un algorithme de contrôle pour fournir une trajectoire de mouvement donnée.

---

**Авторы:** *Балабанов Павел Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; *Егоров Андрей Сергеевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Сенкевич Сергей Алексеевич* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Миرونнов Александр Дмитриевич* – студент; *Буланова Валентина Олеговна* – кандидат технических наук, инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Бобров Даниил Александрович* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Бугров Вадим Александрович* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ МОНОМЕТИЛАНИЛИНА В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ

Д. Ю. Муромцев<sup>1</sup>, В. Н. Назаров<sup>2</sup>✉,  
Б. С. Дмитриевский<sup>2</sup>, Р. В. Воронков<sup>2</sup>, Д. Г. Дмитриев<sup>2</sup>

*Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
«Информационные процессы и управление», ipi\_tstu@mail.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** математическая модель; материальный баланс; монометиланилин; насадочная колонна; нейронные сети; процесс ректификации; система управления; энергетический баланс.

**Аннотация:** Представлена математическая модель ректификации монометиланилина (ММА) в насадочной колонне непрерывного действия. При формировании математической модели использованы физико-химические и термодинамические закономерности процесса ректификации. Представлена математическая модель процессов в колонне, кубе и дефлегматоре. Математическая модель построена для системы управления технологическим процессом очистки ММА на основе цифровых средств автоматизации с использованием нейронных сетей для регулирования концентраций воды, анилина, ММА при возмущениях в виде изменения состава поступающей на разделение смеси.

---

### Введение

Монометиланилин (ММА) используется в качестве присадки, которая повышает детонационную стойкость бензина, то есть существенную характеристику бензина, по которой определяется его использование в разного рода двигателях внутреннего сгорания. Несмотря на большое количество теоретических и практических работ, посвященных получению ММА, задача повышения эффективности процесса очистки ММА и в настоящее время остается актуальной.

Производство ММА состоит из следующих основных стадий: нагрев и испарение исходной смеси; синтез ММА; охлаждение полученного катализата ММА; очистка ММА. Процесс очистки ММА является узким местом в технологической цепочке, так как представляет собой сложный и энергоемкий процесс, происходящий в насадочной ректификационной колонне непрерывного действия. Особенностью данного процесса является то, что разделяемые вещества анилин, ММА, диметиланилин (ДМА) имеют близкие температуры кипения.

### Формирование математической модели процесса ректификации

Методы математического моделирования [1 – 11] позволяют не только исследовать технологический процесс, но и найти пути усовершенствования систем управления. Современное состояние исследований в области моделирования и управления показывает, что построение современной автоматизированной системы управления, невозможно без адекватной математической модели технологического процесса, входящей в ее состав [12 – 17].



В работе [18] приведена математическая модель процесса очистки ММА, состоящая из уравнений, описывающих энергетические процессы в кубе (испарение смеси) и дефлегматоре (конденсация дистиллята), представляющих энергетические и физико-химические процессы в самой ректификационной колонне, учитывающие взаимное влияние компонентов разделяемой смеси.

Катализат ММА подают в точку питания, в куб колонны – пар, в дефлегматор – обратную воду. В верхней части отбирают анилиновую фракцию, в средней части – ММА, а из куба колонны – ДМА.

При выводе уравнений математической модели колонны приняты следующие допущения [4, 8]:

- модель колонны – ячеечная;
- полное перемешивание жидкости и полное вытеснение пара на элементарном участке;
- теплота смешения потоков пара и жидкости равна нулю;
- пар насыщенный, жидкость имеет температуру кипения;
- отсутствует обратное перемешивание в жидкой и паровой фазах.

При выводе уравнений математической модели процессов, протекающих в кубе, приняты допущения:

- масса и теплоемкость теплоносителя (греющий пар) постоянны;
- пар насыщенный;
- в кубе происходит идеальное перемешивание в объеме;
- тепло, отдаваемое теплоносителем, полностью расходуется на нагрев смеси за исключением 20 %, идущих на теплотери.

При выводе уравнений математической модели процессов, протекающих в дефлегматоре, приняты допущения:

- масса и теплоемкость хладагента постоянны.

Математическая модель является довольно сложной и громоздкой для использования ее при расчетах в режиме реального времени. Ее можно использовать для проведения имитационных исследований процесса очистки ММА в ректификационной колонне, которая является сложным объектом управления, характеризующимся большим числом взаимосвязанных выходных технологических координат. Поэтому к системе управления процессом очистки ММА предъявляются повышенные требования. Она должна быть реализована на современных цифровых средствах автоматизации, позволяющих с высокой скоростью и точностью реагировать на возмущающие воздействия и реализовывать алгоритмы управления, отличающиеся от стандартных промышленных алгоритмов применением принципов адаптации на основе искусственного интеллекта с использованием математической модели объекта. Алгоритмы управления должны обладать гибкостью, способностью к обучению. Нейронные сети из-за своей способности обучаться на основе соотношения «вход – выход» пригодны для решения данной задачи, однако в этом случае возрастает количество вычислений.

Предлагаемая модель упрощается за счет сокращения размерности системы уравнений. Такая математическая модель, с уменьшенным вычислительным временем расчета, предназначена для более качественного управления процессом ректификации ММА на основе нейронной сети.

### Математическая модель колонны

С учетом принятого допущения, уравнения материального баланса в жидкой фазе примут вид:

- выше точки питания:

$$\frac{dc_{ji}^j}{d\tau} = \frac{L^1 c_{ji}^{j+1} - L^1 c_{ji}^j + V c_{pi}^{j-1} - V c_{pi}^j}{m}, \quad c_{ji}^j(0) = c_{ji}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (1)$$



– в точке питания:

$$\frac{dc_{ji}^j}{d\tau} = \frac{L^1 c_{ji}^{j+1} - L^2 c_{ji}^j + V c_{pi}^{j-1} - V c_{pi}^j + G_F c_{jif}}{m}, \quad c_{ji}^j(0) = c_{ji}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (2)$$

– ниже точки питания, но выше отбора ММА:

$$\frac{dc_{ji}^j}{d\tau} = \frac{L^2 c_{ji}^{j+1} - L^2 c_{ji}^j + V c_{pi}^{j-1} - V c_{pi}^j}{m}, \quad c_{ji}^j(0) = c_{ji}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (3)$$

– в точке отбора ММА:

$$\frac{dc_{ji}^j}{d\tau} = \frac{L^2 c_{ji}^{j+1} - L^3 c_{ji}^j + V c_{pi}^{j-1} - V c_{pi}^j - G_{\text{ММА}} c_{ji}^j}{m}, \quad c_{ji}^j(0) = c_{ji}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (4)$$

– ниже точки отбора ММА:

$$\frac{dc_{ji}^j}{d\tau} = \frac{L^3 c_{ji}^{j+1} - L^3 c_{ji}^j + V c_{pi}^{j-1} - V c_{pi}^j}{m}, \quad c_{ji}^j(0) = c_{ji}^{j0}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (5)$$

$$L^1 = L, \quad L^2 = L^1 + G_F, \quad L^3 = L^2 - G_{\text{ММА}},$$

где  $c_{ji}$  – концентрация веществ (1 – анилин, 2 – ММА, 3 – ДМА) в жидкой фазе, кг/кг;  $c_{pi}$  – концентрация веществ в паровой фазе, кг/кг;  $L^1, L^2, L^3$  – расход жидкой фазы в разных зонах колонны, кг/с;  $V$  – расход паровой фазы, кг/с;  $G_F$  – расход катализатора ММА на входе в колонну, кг/с;  $G_{\text{ММА}}$  – расход ММА из колонны, кг/с;  $m$  – масса жидкости в ячейке, кг;  $\tau$  – время, с.

Равновесные составы фаз для идеальных смесей по упрощенному соотношению, основанному на законе Рауля, записываются в виде

$$y_i^j = \phi_i(T_j) x_i^j. \quad (6)$$

Для идеальных смесей зависимость  $\phi_i$  имеет вид [11]

$$\phi_i = a_i T_j + b_i. \quad (7)$$

Давление в колонне изменяется линейно по высоте и в точке с координатой  $j$  равно

$$P_j = P_{\text{н}} - \frac{(P_{\text{н}} - P_{\text{в}})j}{Z}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{в}}, P_{\text{н}}$  – давление внизу иверху колонны соответственно;  $Z$  – высота колонны.

Учтем изменение давления по высоте колонны. Тогда равновесные концентрации компонентов найдем по формуле

$$y_i^j = \frac{a_i T_j + b_i}{P_j} x_i^j. \quad (9)$$

Полученные уравнения (1) – (9) описывают динамические режимы процессов разделения многокомпонентной смеси, протекающих в ректификационной колонне.

### Математическая модель куба колонны

Куб колонны представляет собой теплообменник с рубашкой, в котором происходит кипение и испарение смеси. Модель куба колонны состоит из уравнений общего, покомпонентного материального и энергетического балансов.

Уравнение общего материального баланса:

$$\frac{dM_K}{d\tau} = L - V; \quad (10)$$

$$M_K = M_K^0,$$

где  $M_K$  – масса кубовой жидкости, кг;  $M_K^0$  – масса кубовой жидкости в начальный момент времени, кг.

Уравнения покомпонентного материального баланса:

$$\frac{d(M_K c_{ж1}^K)}{d\tau} = L c_{ж1} - V c_{п1}^K; \quad (11)$$

$$\frac{d(M_K c_{ж2}^K)}{d\tau} = L c_{ж2} - V c_{п2}^K; \quad (12)$$

$$\frac{d(M_K c_{ж3}^K)}{d\tau} = L c_{ж3} - V c_{п3}^K; \quad (13)$$

$$c_{ж1}^K(0) = c_{ж1}^{K0}; \quad c_{ж2}^K(0) = c_{ж2}^{K0}; \quad c_{ж3}^K(0) = c_{ж3}^{K0},$$

где  $c_{ж1}^K, c_{ж2}^K, c_{ж3}^K$  – концентрации анилина, ММА и ДМА в кубовой жидкости соответственно, кг/кг;  $c_{ж1}^{K0}, c_{ж2}^{K0}, c_{ж3}^{K0}$  – концентрации анилина, ММА и ДМА в кубовой жидкости в начальный момент времени соответственно, кг/кг;  $c_{п1}^K, c_{п2}^K, c_{п3}^K$  – концентрации анилина, ММА и ДМА в парах куба соответственно, кг/кг.

Концентрации компонентов в паровой фазе равны равновесным концентрациям:

$$c_{п1}^K = c_{п1}^{K*}; \quad c_{п2}^K = c_{п2}^{K*}; \quad c_{п3}^K = c_{п3}^{K*}.$$

Уравнение энергетического баланса:

$$\frac{d(M_K i_K)}{d\tau} = L i_{ж} - V i_K + Q_K - V r_K; \quad (14)$$

$$i_K = i_K^0,$$

где  $Q_K$  – тепловой поток на нагрев кубовой жидкости, Дж/с;  $i_K$  – удельная энтальпия кубовой смеси, Дж/кг;  $r_K$  – удельная теплота парообразования испарившейся смеси, Дж/кг.

Уравнение материального баланса по пару в рубашке

$$\frac{dm_{п}^{об}}{d\tau} = g_{п}^{об} - g_K^{об}. \quad (15)$$

Так как масса конденсата, накапливающаяся в рубашке, практически равна нулю, то можно считать

$$g_{\Pi}^{об} - g_{\kappa}^{об} = 0, \quad (16)$$

где  $m_{\Pi}^{об}$  – масса пара в рубашке, кг;  $g_{\Pi}^{об}$ ,  $g_{\kappa}^{об}$  – расходы пара и конденсата соответственно, кг/с.

Уравнение энергетического баланса для рубашки куба

$$\frac{d(m_{\Pi}^{об} i_{\Pi}^{об})}{d\tau} = -k^{\kappa} F^{\kappa} (t_{\Pi}^{\kappa} - t_{\kappa}^{\kappa}) + g_{\Pi}^{об} i_{\Pi}^{об} - g_{\kappa}^{об} i_{\kappa}^{об}, \quad (17)$$

где  $i_{\Pi}^{об}$  – удельная внутренняя энергия пара в рубашке куба, Дж/кг;  $i_{\Pi}^{об}$ ,  $i_{\kappa}^{об}$  – энтальпии греющего пара и конденсата соответственно, Дж/кг;  $F^{\kappa}$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $k^{\kappa}$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{\Pi}^{\kappa}$ ,  $t_{\kappa}^{\kappa}$  – температуры пара в рубашке куба и нагреваемой жидкости соответственно, °С.

Расход греющего пара определим

$$g_{\Pi}^{об} = \Phi(p_{\Pi}, p_{\Pi}^{\kappa}, \mu^{\kappa}), \quad (18)$$

где  $p_{\Pi}$  – давление в паропроводе, кПа;  $p_{\Pi}^{\kappa}$  – давление в рубашке куба кПа;  $\mu^{\kappa}$  – пропускная способность клапана.

Энтальпия греющего пара

$$i_{\Pi}^{об} = f_1(P_{\text{пар}}), \quad (19)$$

где  $P_{\text{пар}}$  – давление греющего пара, кПа.

Полученные уравнения (10) – (19) представляют математическую модель процессов, происходящих в кубе колонны.

### Математическая модель дефлегматора колонны

В дефлегматоре колонны, представляющем собой кожухотрубчатый двухходовой теплообменник, происходит конденсация и охлаждение дистиллята. Модель дефлегматора состоит из уравнений общего, покомпонентного материального и энергетического балансов.

Уравнение общего материального баланса:

$$\frac{dM_{\text{д}}}{d\tau} = V - L - D; \quad (20)$$

$$M_{\text{д}} = M_{\text{д}}^0,$$

где  $M_{\text{д}}$  – масса жидкости в дефлегматоре, кг;  $M_{\text{д}}^0$  – масса жидкости в дефлегматоре в начальный момент времени, кг;  $D$  – расход дистиллята, кг/с.

Уравнения покомпонентного материального баланса:

$$\frac{d(M_{\text{д}} c_{\text{ж1}}^{\text{д}})}{d\tau} = V c_{\text{п1}} - L c_{\text{ж1}}^{\text{д}} - D c_{\text{ж1}}^{\text{д}}; \quad (21)$$

$$\frac{d(M_{\text{д}}c_{\text{ж2}}^{\text{д}})}{d\tau} = Vc_{\text{п2}} - Lc_{\text{ж2}}^{\text{д}} - Dc_{\text{ж2}}^{\text{д}} ; \quad (22)$$

$$\frac{d(M_{\text{д}}c_{\text{ж3}}^{\text{д}})}{d\tau} = Vc_{\text{п3}} - Lc_{\text{ж3}}^{\text{д}} - Dc_{\text{ж3}}^{\text{д}} ; \quad (23)$$

$$c_{\text{ж1}}^{\text{д}}(0) = c_{\text{ж1}}^{\text{д0}} ; \quad c_{\text{ж2}}^{\text{д}}(0) = c_{\text{ж2}}^{\text{д0}} ; \quad c_{\text{ж3}}^{\text{д}}(0) = c_{\text{ж3}}^{\text{д0}} ,$$

где  $c_{\text{ж1}}^{\text{д}}$ ,  $c_{\text{ж2}}^{\text{д}}$ ,  $c_{\text{ж3}}^{\text{д}}$  – концентрация анилина, ММА, ДМА во флегме соответственно, кг/кг;  $c_{\text{ж1}}^{\text{д0}}$ ,  $c_{\text{ж2}}^{\text{д0}}$ ,  $c_{\text{ж3}}^{\text{д0}}$  – концентрация анилина, ММА, ДМА во флегме в начальный момент времени соответственно, кг/кг.

Уравнение энергетического баланса:

$$\frac{d(M_{\text{д}}i_{\text{д}})}{d\tau} = Vi_{\text{п}} - Li_{\text{д}} - Di_{\text{д}} - Q_{\text{д}} ; \quad (24)$$

$$i_{\text{д}}(0) = i_{\text{д}}^0 ,$$

где  $i_{\text{д}}$  – энтальпия жидкости в дефлегматоре, Дж/кг;  $r$  – удельная теплота парообразования испарившейся смеси, Дж/кг;  $Q_{\text{д}}$  – тепловой поток, отводимый при конденсации паров в дефлегматоре, Дж/с, определяемый по формуле

$$Q_{\text{д}} = g_{\text{в}}^{\text{ох}} (i_{\text{в}}^{\text{вх}} - i_{\text{в}}^{\text{вых}}) , \quad (25)$$

где  $i_{\text{в}}^{\text{вх}}$ ,  $i_{\text{в}}^{\text{вых}}$  – энтальпии охлаждающей воды соответственно на входе и выходе из дефлегматора, Дж/кг.

Полученные уравнения (20) – (25) представляют математическую модель процессов, происходящих в дефлегматоре колонны.

### Заключение

Разработанная модель процесса ректификации ММА пригодна для исследования процесса очистки ММА в ректификационной колонне. Алгоритм управления, построенный на основе нейросетевой системы регулирования с использованием разработанной модели, позволяет управлять процессом ректификации при разных значениях возмущающих воздействий, в частности при изменении состава и расхода поступающей на разделение смеси.

### Список литературы

1. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака / В. С. Кудряшов, С. Г. Тихомиров, С. В. Рязанцев, А. В. Иванов, И. А. Козенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 572 – 580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580
2. Коновалов, В. И. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 796 – 811.

3. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062
4. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 3(55). – С. 55 – 62.
5. Бракоренко, А. С. Моделирование технологических процессов в ходе разработки и отладки АСУ ТП / А. С. Бракоренко // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 21 – 27.
5. Двухмодельный комплекс для исследования процесса адсорбции водорода / Б. С. Дмитриевский, М. Х. Х. Альруйшид, А. А. Терехова [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 528 – 535. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp. 528-535
7. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом адсорбционного получения водорода / М. Х. Х. Альруйшид, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 35 – 45. doi: 12.17277/vestnik.2022.01.pp.035-045
8. Анисимов, И. В. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок / И. В. Анисимов, В. И. Бодров, В. Б. Покровский. – Москва : Химия, 1975. – 216 с.
9. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Н. В. Ушева, О. Е. Мойзес, О. Е. Митянина, Е. А. Кузьменко. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
10. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А. В. Кравцов, Э. Д. Иванчина, Е. Н. Ивашкина [и др.] // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41 – 46.
11. Грачев, Ю. П. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов / Ю. П. Грачев, А. К. Тубольцев, В. К. Тубольцев. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 216 с.
12. Sharma, K. L. S. Overview of industrial process automation / K. L. S. Sharma. – Amsterdam : Elsevier Science, 2011. – 320 p.
13. Рылов, М. А. Обзор систем усовершенствованного управления технологическими процессами / М. А. Рылов // Исследовано в России (электронный научный журнал). – 2013. – № 8. – С. 120 – 126.
14. Степанец, А. В. Регулирующий адаптивный комплекс на основе каскадной системы с моделью объекта управления / А. В. Степанец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/10(56). – С. 14 – 18.
15. Redutskiy, Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry / Yu. Redutskiy // Procedia. Computer Science. – 2017. – Vol. 109. – P. 745 – 753.
16. Галяув, Е. Р. Робастное оптимальное управление линейными объектами с эталонной моделью / Е. Р. Галяув, И. Б. Фуртат // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 22 – 25.
17. Кудряшов, В. С. Способ автоматизированного синтеза структуры передаточных функций автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В. С. Кудряшов // Вестн. Воронеж. гос. технол. акад. Серия : Информационные технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 16 – 20.
18. Назаров, В. Н. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом очистки монометиланилина в ректификационной колонне : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Назаров Виктор Николаевич. – Тамбов, 2010. – 115 с.

## Mathematical Model of Purification of Monomethylaniline in a Distillation Column

D. Yu. Muromtsev<sup>1</sup>, V. N. Nazarov<sup>2</sup>✉,  
B. S. Dmitrievsky<sup>2</sup>, R. V. Voronkov<sup>2</sup>, D. G. Dmitriev<sup>2</sup>

*Departments: Radioelectronic and Microprocessor Systems Design (1);  
Information Processes and Control (2), ipu\_tstu@mail.ru;  
TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** mathematical model; material balance; monomethylaniline; packed column; neural networks; rectification process; control system; energy balance.

**Abstract:** The article presents a mathematical model of rectification of monomethylaniline in a batch nozzle. The physico-chemical and thermodynamic patterns of the rectification process were used in the formation of the mathematical model. A mathematical model of the column, cube and deflector itself is presented. The mathematical model is constructed for use in a control system for the technological process of monomethylaniline purification based on digital automation tools using neural networks to regulate concentrations of water, aniline, and monomethylaniline under disturbances in the form of changes in the composition of the mixture undergoing separation.

### References

1. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Method of modeling a multivariate digital control system for the ammonia synthesis process], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Konovalov V.I., Gatapova N.C. [The main ways of energy saving and optimization in heat and mass transfer processes and equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 796-811. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Saif M.N.M., Matveikin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiconnected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Demidenko N.D., Kulagina L.V. [Modeling and optimization of technological systems with distributed parameters], *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibGAU], 2014, no. 3(55), pp. 55-62. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Brakorenko A.S. [Modeling of Technological Processes during the Development and Debugging of APCS], *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya*. [Electrical Engineering Complexes and Control Systems], 2014, no. 3, pp. 21-27. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Dmitrievsky B.S., Alruyshid M.H.H., Terekhova A.A. [et al.], [A two-model complex for studying the process of hydrogen adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 528-535. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.528-535 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Alruyshid M.H.H., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A. [et al.], [Mathematical modeling and optimal control of the process of adsorption production of hydrogen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 35-45. doi: 12.17277/vestnik.2022.01.pp.035-045 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Anisimov I.V., Bodrov V.I., Pokrovskiy V.B. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya rektifikatsionnykh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of distillation units], Moscow: Chemistry, 1975, 216 p. (In Russ.)
  9. Usheva N.V., Moises O.E., Mityanina O.E., Kuzmenko E.A. *Matematicheskoye modelirovaniye khimiko-tehnologicheskikh protsessov* [Mathematical Modeling of Chemical-Engineering Processes], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, 135 p. (In Russ.)
  10. Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N. [et al.], [Mathematical Modeling of Catalytic Processes of Hydrocarbon Feedstock Processing], *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2008, no. 6, pp. 41-46 (In Russ., abstract in Eng.)
  11. Grachev Yu.P., Tuboltsev A.K., Tuboltsev V.K. *Modelirovaniye i optimizatsiya teplo- i massoobmennyykh protsessov* [Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes], Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1984, 216 p. (In Russ.)
  12. Sharma K.L.S. *Overview of industrial process automation*, Amsterdam: Elsevier Science, 2011, 320 p.
  13. Rylov M.A. [Review of advanced control systems for technological processes], *Issledovano v Rossii (elektronnyy nauch-nyy zhurnal)* [Researched in Russia (electronic scientific journal)], 2013, no. 8, pp. 120-126 (In Russ., abstract in Eng.)
  14. Stepanets A.V. [Adaptive control complex based on a cascade system with a control object model], *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East European Journal of Advanced Technologies], 2012, no. 2/10(56), pp.14-18. (In Russ., abstract in Eng.)
  15. Redutskiy Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry, *Procedia. Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 745-753.
  16. Galyauv E.R., Furtat I.B. [Robust optimal control of linear objects with a reference model], *Pribory i sistemy. Upravle-niye, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2010. no. 2, pp. 22-25. (In Russ., abstract in Eng.)
  17. Kudryashov V.S. [Method of automated synthesis of the structure of transfer functions of autonomous compensators of a multiconnected digital control system], *Vestnik Voronezhskoy gosudarstvennoy tekhnologicheskoy akademii Seriya Informatsionnyye tekhnologii, modelirovaniye i upravleniye* [Bulletin of the Voronezh State Technological Academy Series Information Technology, Modeling and Control], 2011, no. 2, pp. 16-20. (In Russ., abstract in Eng.)
  18. Nazarov V.N. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Tambov, 2010, 115 p. (In Russ.)
- 

### **Mathematisches Modell der Monomethylanilinreinigung in einer Destillationskolonne**

**Zusammenfassung:** Es ist ein mathematisches Modell für die Destillation von Monomethylanilin (MMA) in einer kontinuierlichen Füllkörperkolonne vorgestellt. Physikalisch-chemische und thermodynamische Prinzipien des Destillationsprozesses sind bei der Entwicklung des Modells berücksichtigt. Das Modell beschreibt die Prozesse in Kolonne, Destillierapparat und Dephlegmator. Es dient als Grundlage für ein Prozessleitsystem zur MMA-Reinigung, das auf digitalen Automatisierungswerkzeugen und neuronalen Netzen basiert. Dieses System regelt die Konzentrationen von Wasser, Anilin und MMA unter Störungen wie z. B. Änderungen der Zusammensetzung des Eingangsgemisches.



## Modèle mathématique de purification de la monométhylaniline dans la colonne de rectification

**Résumé:** Est présenté un modèle mathématique de rectification de la monométhylaniline (MRM) dans une colonne de buse continue. Lors de la formation d'un modèle mathématique, les modèles physico-chimiques et thermodynamiques du processus de rectification sont utilisés. Est présenté un modèle mathématique des processus dans une colonne, un cube et un déflegmateur. Le modèle mathématique est construit pour le système de contrôle du processus de nettoyage MRM à la base de moyens d'automatisation numériques utilisant des systèmes neuronaux pour réguler les concentrations d'eau, d'aniline et de MRM en cas de perturbations sous la forme de changements dans la composition du mélange entrant dans la séparation.

---

**Авторы:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научной работе; *Назаров Виктор Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Воронков Роман Вячеславович* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дмитриев Дмитрий Геннадьевич* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

## ГИБРИДНЫЙ ПОКООРДИНАТНЫЙ СПУСК ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ РАЗНОГАБАРИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Р. В. Арутюнян<sup>1</sup>, С. Я. Егоров<sup>2</sup>, С. А. Некрасов<sup>3</sup>, Н. В. Быковский<sup>4</sup>✉

*Кафедра «Математическая кибернетика и информационные технологии» (1),  
ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи  
и информатики», Москва, Россия;*

*кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (2),  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,  
Тамбов, Россия;*

*кафедры «Прикладная математика» (3) «Физика и фотоника» (4),  
back\_of\_sky@bk.ru;*

*ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет  
им. М. И. Платова», Новочеркасск, Россия*

**Ключевые слова:** адаптивная гибридизация; дискретные пространства; инкрементальные вычисления; квадратичная задача о назначениях; комбинаторная оптимизация; мультистартовая диверсификация; размещение разногабаритных элементов.

**Аннотация:** Рассмотрена  $NP$ -трудная задача комбинаторной оптимизации – дискретное размещение разногабаритных элементов с учетом сложных геометрических ограничений. Для ее решения предложена оригинальная гибридная схема, которая объединяет модифицированный покоординатный спуск для локального поиска и мультистартовую диверсификацию для исследования глобального пространства решений. Математическая модель формализована как обобщенная квадратичная задача о назначениях, где ограничения на непересечение, запретные зоны и связность составных элементов учитываются через систему адаптивных штрафных функций. Ключевым элементом, обеспечивающим вычислительную эффективность, является применение инкрементальных оценок, что позволяет пересчитывать изменение целевого функционала при локальных шагах (парных обменах) за линейное время  $O(n)$ . Эмпирическая валидация методологии проведена на наборе репрезентативных задач малой и средней размерности, включая моделирование компоновки печатных плат с запретными областями произвольной формы. Результаты численных экспериментов подтвердили высокую устойчивость алгоритма к выбору начальных приближений и корректную обработку гетерогенных элементов. Показано, что гибридная схема обеспечивает более быструю и стабильную сходимость по сравнению с классическими стохастическими подходами. Разработанная программная реализация поддерживает как двумерные, так и трехмерные дискретные решетки и различные метрики расстояний. Сформулированы ограничения метода и намечены пути его дальнейшего развития.

---

### Введение

Экспоненциальный рост сложности интегральных схем привел к качественному изменению методологических подходов в области физического проектирования. Современные процессоры содержат свыше 50 млрд транзисторов [1 – 3], каждое новое поколение технологических норм удваивает плотность размещения.

Критичным становится не минимизация общей длины соединений, а обеспечение выполнения множественных ограничений: тепловых, временных, электромагнитных.

Эволюция методов размещения демонстрирует переход от простых к комплексным подходам. Ранние работы Кляйнханса по квадратичному программированию [4] заложили основы аналитических методов. Субмикронные технологии потребовали учета управления перегрузками, оптимизации мощности, термального баланса [5]. Революционным стало применение машинного обучения: работа [3] показала превосходство обучения с подкреплением (RL) над классическими эвристиками на промышленных схемах Google.

Параллельно развивались подходы для смежных областей. В облачных вычислениях задача размещения виртуальных машин решается с учетом динамической миграции и балансировки нагрузки [6, 7]. Квантовые вычисления породили специфические требования к топологии размещения кубитов, учитывающие декогеренцию и ограничения на связность [8]. Производственная логистика оперирует трехмерными конфигурациями с временными окнами и переменными габаритами.

Математическая сущность проблемы сводится к дискретной оптимизации на комбинаторных структурах. Доказана  $NP$ -трудность уже для простейших постановок [2], что исключает возможность построения полиномиальных точных алгоритмов при условии  $P \neq NP$ . Практические задачи усложняются наличием гетерогенных элементов, запретных зон, фиксированных терминалов. Стандартная формулировка через квадратичную задачу о назначениях требует  $O(n!)$  переборов для  $n$  элементов.

Существующие методологии делятся по гарантиям оптимальности. Точные методы (целочисленное линейное программирование, ILP; ветви и границы) применимы для малых размерностей (до 100 элементов). Классические метаэвристики (генетические алгоритмы, имитация отжига, муравьиные колонии) дают приемлемое качество за полиномиальное время, но чувствительны к настройке [7, 9]. Гибридные методы часто показывают лучшее соотношение качества и времени вычислений [5, 10, 11]. Комбинаторные подходы, в частности, продемонстрировали свою эффективность при решении задач размещения элементов нерегулярной формы в многомерных пространствах со сложной топологией [12, 13].

Критический анализ литературы выявляет пробел в области адаптивных методов для разногабаритных элементов. Большинство работ оперирует точечными объектами или прямоугольными блоками фиксированного размера. Реальные задачи требуют размещения элементов произвольной формы с учетом их ориентации и деформируемости. Недостаточно исследованы механизмы динамической коррекции параметров в процессе оптимизации.

*Цель работы* – разработка и исследование гибридного метода для задачи дискретного размещения разногабаритных элементов, способного эффективно обрабатывать сложные геометрические ограничения.

Для восполнения указанных пробелов предложена адаптивная гибридизация локального поиска. Метод объединяет модифицированный покоординатный спуск с мултистартом и обеспечивает устойчивость к начальным условиям. Инкрементальные вычисления ускоряют оценку целевой функции. Эффективность подтверждена на репрезентативных тестах. Основной акцент – задачи малой и средней размерности (цеховые размещения, электрические и радиотехнические цепи [14 – 16]), где достигается сбалансированное качество при типовых ресурсах.

### Постановка задачи и математическая формализация

Пространство размещения формализуется как дискретная решетка  $\mathcal{L} = \mathbb{Z}_{n_x} \times \mathbb{Z}_{n_y}$ , где  $\mathbb{Z}_k = \{1, 2, \dots, k\}$ . Каждая позиция  $(i, j) \in \mathcal{L}$  соответствует элементарной ячейке с координатами центра  $(x_{ij}, y_{ij}) = (ih, jh)$ , где  $h$  – шаг дискретизации.

**Определение 1** (конфигурационное пространство). Для множества элементов  $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$  с геометрическими характеристиками  $\{G_1, \dots, G_n\}$ , где  $G_i \subset \mathbb{Z}^2$  определяет занимаемую область, конфигурационным пространством называется

$$\mathcal{C} = \left\{ p: \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{L} \mid \forall i \neq j: G_i(p(e_i)) \cap G_j(p(e_j)) = \emptyset \right\},$$

где  $G_i(p(e_i))$  обозначает трансляцию области  $G_i$  в позицию  $p(e_i)$ .

Введем матрицу связности  $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ , где  $r_{ij} \geq 0$  определяет интенсивность взаимодействия между элементами  $e_i$  и  $e_j$ . Матрица  $R$  симметрична и неотрицательна. Для составных элементов вводятся виртуальные связи высокой интенсивности  $r_{ij} = \omega$ , где  $\omega \gg \max_{p,q} r_{pq}$ .

**Определение 2** (целевой функционал). Качество размещения  $p \in \mathcal{C}$  оценивается функционалом:

$$\Phi(p) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n r_{ij} d(p(e_i), p(e_j)) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \Psi_k(p), \quad (1)$$

где  $d: \mathcal{L} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{R}_+$  – метрика на решетке;  $\Psi_k$  – штрафные функции ограничений;  $\lambda_k > 0$  – адаптивные множители.

Для вычислительной эффективности вводится биективное отображение между двумерными координатами и линейными индексами:

**Лемма 1** (линеаризация координат). Отображения  $\varphi: \mathcal{L} \rightarrow \{1, \dots, n_x n_y\}$  и  $\varphi^{-1}$  определяются как

$$\varphi(i, j) = (i-1)n_y + j, \quad \varphi^{-1}(k) = \left( \left\lfloor \frac{k-1}{n_y} \right\rfloor + 1, (k-1) \bmod n_y + 1 \right). \quad (2)$$

Обозначение  $\lfloor \dots \rfloor$  соответствует функции целой части. Дробная составляющая при этом отбрасывается, и результат равен наибольшему целому числу, не превышающему аргумент.

Данные отображения взаимно обратны и сохраняют метрические свойства с точностью до масштабирования.

*Доказательство.* Проверим композицию  $\varphi^{-1} \circ \varphi$ . Пусть  $(i, j) \in \mathcal{L}$ , тогда  $k = \varphi(i, j) = (i-1)n_y + j$ . Имеем:

$$\left\lfloor \frac{k-1}{n_y} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{(i-1)n_y + j - 1}{n_y} \right\rfloor = i-1,$$

$$(k-1) \bmod n_y = ((i-1)n_y + j - 1) \bmod n_y = j-1.$$

Следовательно,  $\varphi^{-1}(k) = (i, j)$ , что доказывает биективность.

Основная оптимизационная задача формулируется следующим образом:

**Теорема 1** (сложность задачи размещения). Задача минимизации функционала (1) на конфигурационном пространстве  $\mathcal{C}$  является  $NP$ -трудной даже при единичных весах  $r_{ij} \in \{0, 1\}$  и манхэттенской метрике.

*Доказательство.* Редукция от задачи о квадратичном назначении (англ. – Quadratic assignment problem (QAP)). Для произвольной инстанции QAP с матрицами потоков  $F$  и расстояний  $D$  строим эквивалентную задачу размещения, полагая  $r_{ij} = F_{ij}$  и ограничивая размещение точечных элементов заданными позициями. Оптимальное решение исходной QAP восстанавливается из оптимального размещения за полиномиальное время.

### Алгоритмическая реализация и анализ сложности

Раздел содержит формальное описание алгоритмической процедуры. Отдельно рассматривается доказательство сходимости. Завершает изложение асимптотический анализ вычислительных затрат.

Реализация: конфигурация  $p$  хранится как перестановка; расстояния  $d(\cdot, \cdot)$  считаются на лету; ограничения заданы предикатами  $\Psi_k$  и штрафами; составные элементы удерживаются виртуальными связями  $\omega \gg \max r_{pq}$ . Диапазон  $\lambda_k$  ограничен  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ . Рестарты формируют допустимые старты  $p^{(0)}$  и исследуют разные области поиска.

**Теорема 2** (сходимость локального поиска). Алгоритм локального поиска с парными перестановками сходится к локальному минимуму за конечное число итераций  $I \leq \binom{n}{2} \Delta_{\max}$ , где  $\Delta_{\max}$  – максимальная разность значений функционала.

*Доказательство.* Последовательность значений  $\{\Phi(p^{(t)})\}_{t=0}^{\infty}$  монотонно убывает и ограничена снизу нулем. На каждой итерации либо происходит улучшение на величину не менее  $\delta_{\min} > 0$  (минимальное улучшение при дискретной метрике), либо достигается локальный минимум. Число возможных конфигураций конечно:  $|C| \leq (n_x n_y)! / (n_x n_y - n)!$ . Следовательно, алгоритм завершается за конечное число шагов.

Ключевым элементом эффективности является инкрементальное вычисление.

**Л е м м а 2** (инкрементальная оценка). При перестановке элементов  $e_i$  и  $e_j$  изменение функционала вычисляется за  $O(n)$  операций:

$$\Delta\Phi_{ij} = \sum_{k \neq i, j} [r_{ik}(d(p(e_j), p(e_k)) - d(p(e_i), p(e_k))) + r_{jk}(d(p(e_i), p(e_k)) - d(p(e_j), p(e_k)))], \quad (3)$$

*Доказательство.* При обмене позиций элементов  $e_i$  и  $e_j$  в сумме (1) меняются только слагаемые, содержащие индексы  $i$  или  $j$ . Таких слагаемых порядка  $2(n-2)$ , что и дает линейную сложность оценки.

Механизм адаптации штрафных множителей основан на анализе нарушений ограничений

$$\lambda_k^{(t+1)} = \begin{cases} \min(\rho \lambda_k^{(t)}, \lambda_{\max}), & \text{если } \Psi_k(p^{(t)}) > \varepsilon, \\ \max(\lambda_k^{(t)} / \rho, \lambda_{\min}), & \text{если } \Psi_k(p^{(t)}) = 0, \\ \lambda_k^{(t)}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\rho > 1$  – коэффициент адаптации;  $\varepsilon$  – порог допустимого нарушения.

**Теорема 3** (завершение локального поиска) Локальный поиск, принимающий только улучшающие попарные обмены, за конечное число шагов достигает локального минимума функционала  $\Phi$  на  $C$ .

*Доказательство.* Значения  $\Phi$  образуют конечное множество, поскольку множество конфигураций  $C$  конечно. На каждом шаге алгоритм принимает только обмен, строго уменьшающий  $\Phi$ . Следовательно, последовательность значений  $\Phi$  строго убывает и не может содержать циклов. Переходы завершаются, когда отсутствуют улучшающие обмены, то есть достигнут локальный минимум.

**Теорема 4** (достижимость глобального оптимума при рестартах). Пусть существует  $\varepsilon > 0$  такое, что из любой конфигурации  $p$  в окрестности  $B_{\psi^*}(\varepsilon)$  глобального оптимума  $\psi^*$  локальный поиск, принимающий только улучшающие обмены, сходится к глобальному оптимуму  $\psi^*$ . Если генерация стартовых конфигураций эргодична (вероятность попадания в каждую открытую область положительна) и число рестартов не ограничено, то глобальный оптимум достигается с вероятностью 1.

*Доказательство.* Обозначим через  $B_{\psi^*}(\varepsilon)$  указанную окрестность притяжения. По эргодичности существует  $p > 0$ , что старт попадает в  $B_{\psi^*}(\varepsilon)$  с вероятностью  $p$ . Для  $T$  независимых рестартов вероятность ни разу не попасть в  $B_{\psi^*}(\varepsilon)$  равна  $(1-p)^T \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow \infty$ . По предположению о локальной сходимости из  $B_{\psi^*}(\varepsilon)$  локальный поиск достигает  $\psi^*$ , откуда следует утверждение, что вероятность нахождения глобального оптимума равна единице.

Схема метода: гибрид локального поиска и диверсификации. Три фазы – инициализация, локальные улучшения, адаптивная диверсификация. Локальные шаги – попарные обмены с инкрементальной оценкой  $\Delta\Phi$  по формуле (3). Штрафы обновляются по правилу (4).

Метод имеет аналогию с блочными схемами Гаусса–Зейделя. Подмножества элементов оптимизируются последовательно при фиксированных остальных. Предобуславливание реализуется выбором порядка обработки согласно вкладу элементов в целевую функцию. В ряде тестов упорядоченная обработка пар давала снижение числа итераций по сравнению со случайным порядком; величина эффекта существенно зависит от структуры связности и настроек, строгая статистическая оценка требует отдельного исследования.

### Учет геометрических и топологических ограничений

Реальные задачи размещения характеризуются гетерогенностью элементов и сложностью ограничений. Предлагаемая методология обеспечивает универсальный механизм их учета через систему штрафных функций и структурную декомпозицию.

Элемент произвольной конфигурации  $e_i$  представляется через покрытие базовыми ячейками:

**Определение 3** (составной элемент). Элемент  $e_i$  с геометрией  $G_i \subset \mathbb{Z}^2$  декомпозируется на  $m_i$  связанных ячеек  $\{c_{i,1}, \dots, c_{i,m_i}\}$ . Связность обеспечивается введением виртуальных ребер с весами:

$$w_{jk}^{(i)} = \begin{cases} \omega, & \text{если ячейки } c_{i,j}, c_{i,k} \text{ смежны в } G_i, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где  $\omega = K \max_{p,q} r_{pq}$ ,  $K \gg 1$  – коэффициент доминирования.

**Лемма 3** (сохранение связности). При  $K > n^2 \max_{i,j} |G_i| |G_j|$  оптимальное размещение сохраняет связность всех составных элементов.

*Доказательство.* Стоимость разрыва виртуального ребра превышает максимально возможное улучшение от оптимизации внешних связей. Суммарный вес внешних связей ограничен величиной порядка  $n^2 \max r_{pq}$ , тогда как стоимость одного разрыва равна  $\omega h$ , где  $h$  – минимальное расстояние между несмежными ячейками.

Геометрические ограничения формализуются через систему предикатов

$$\Psi(p) = \bigvee_{k=1}^K \Psi_k(p), \Psi_k : \mathcal{C} \rightarrow \{0, 1\}, \quad (6)$$

где каждый предикат  $\Psi_k$  проверяет выполнение  $k$ -го ограничения.

Запретные зоны произвольной формы задаются через характеристические функции

$$\Psi_{\text{запрет}}(p) = \sum_{i=1}^n \sum_{z \in \mathcal{Z}} \lambda_z(t) \mathbb{I} \left[ G_i(p(e_i)) \cap z \neq \emptyset \right], \quad (7)$$

где  $\mathcal{Z}$  – множество запретных зон;  $\lambda_z(t)$  – адаптивный штраф для зоны  $z$  на итерации  $t$ .

Методология естественным образом распространяется на трехмерные конфигурации, востребованные в задачах размещения компонентов на многослойных печатных платах, складской логистики и архитектурного планирования.

**Теорема 5** (трехмерная линейаризация). Для решетки  $\mathcal{L}_{3D} = \mathbb{Z}_{n_x} \times \mathbb{Z}_{n_y} \times \mathbb{Z}_{n_z}$  биективное отображение  $\phi : \mathcal{L}_{3D} \rightarrow \{1, \dots, N\}$ , где  $N = n_x n_y n_z$ , задается формулами (для исключения путаницы линейный индекс обозначим через  $q$ ):

$$\begin{aligned} \phi(i, j, k) &= (i-1)n_y n_z + (j-1)n_z + k; \\ \phi^{-1}(q) &= \left( \frac{q-1}{n_y n_z} + 1, \frac{(q-1) \bmod (n_y n_z)}{n_z} + 1, (q-1) \bmod n_z + 1 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

*Доказательство.* Доказательство проводится индукцией по размерности. База индукции – одномерный случай тривиален. Переход: представим трехмерную решетку как стек двумерных слоев. Индекс  $q$  однозначно определяет слой  $s = \lceil (q-1)/(n_y n_z) \rceil$  и позицию внутри слоя  $r = (q-1) \bmod (n_y n_z) + 1$ . По индуктивному предположению  $r$  однозначно определяет  $(j, k)$ . Композиция отображений дает требуемую биекцию.

Вычислительная сложность трехмерного случая возрастает незначительно: добавляется  $O(1)$  операций на преобразование координат. Метрики обобщаются естественно: манхэттенская  $d_1((x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| + |z_1 - z_2|$ , евклидова через стандартную норму в  $\mathbb{R}^3$ .

### Экспериментальная верификация

Эмпирическая валидация разработанной методологии проводилась на структурированном наборе тестовых инстанций, охватывающих ключевые классы практических задач. Экспериментальный протокол включал три фазы: калибровку параметров, оценку производительности и сравнительный анализ.

Программный комплекс [11] предназначен для расчета оптимальных размещений в двумерных (2D) и трехмерных (3D) структурах с учетом конструктивных ограничений (крупногабаритные элементы, запретные зоны, фиксированные



клеммы). Реализованы выбор метрики, адаптивные штрафы, визуализация и сохранение результатов. Архитектура модульная: генерация стартов, локальные операторы, метрики, блок ограничений, слой визуализации. Комплекс ориентирован на инженерные задачи малой и средней размерности (приборостроение, электротехника, учебные сценарии) и не требует экстремальных вычислительных ресурсов.

Тестовый корпус формировался по принципам репрезентативности и воспроизводимости: использовались решетки малой и средней размерности, структурированные задачи с известным оптимумом (тип «змейка») для проверки корректности, а также модели печатных плат с запретными зонами произвольной формы. Для оценки устойчивости применялись повторные запуски; фиксировались значения целевой функции и время выполнения. Задачи размерности  $6 \times 6$  (18 – 36 элементов) решаются за 2 – 5 мин при типовых ресурсах. Увеличение размерности до  $10 \times 10$  приводит к росту времени до 15 – 20 мин. Зависимость близка к квадратичной, что согласуется с теоретическими оценками.

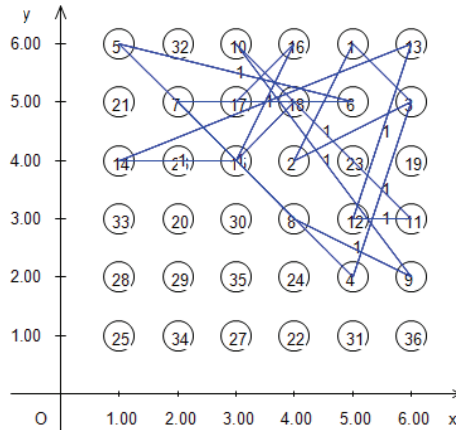
### Результаты численных экспериментов

**Пример А** (плоское размещение с прямоугольной запретной областью). Исследована работа метода при наличии связанной запретной области. На решетке  $6 \times 6$  размещались 18 элементов с исключением зоны  $\{(x, y): 1 \leq x \leq 5, 1 \leq y \leq 4\}$ . Связи между элементами задавались случайно с ограничениями на степень, что имитирует разнообразные топологии (рис. 1).

Эволюция целевого функционала имеет ступенчатый характер из-за дискретности пространства решений (рис. 2). На первых шагах наблюдаются крупные улучшения за счет грубых обменов; по мере стабилизации штрафов амплитуда приростов снижается.

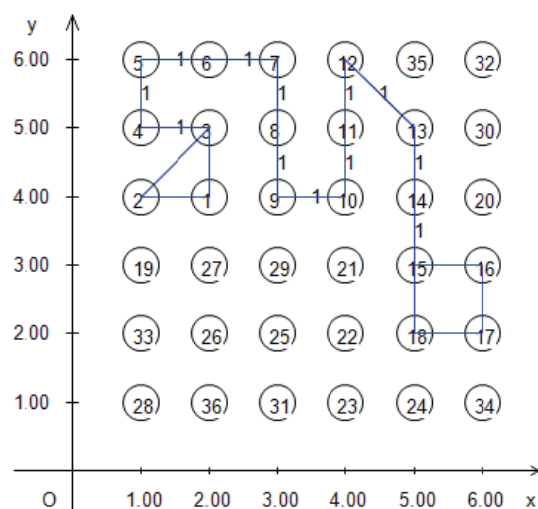
Пример динамики изменения целевой функции и лучшего найденного значения при мултистартовой оптимизации приведен на рис. 3.

**Пример Б** (круговая запретная область). Запретная область задавалась неравенством  $(x - 3,5)^2 + (y - 3,5)^2 \leq 1,5^2$  в непрерывном приближении с последующей дискретизацией (рис. 4). Дополнительно фиксировались позиции двух терминальных элементов для имитации внешних интерфейсов.



**Рис. 1. Начальная конфигурация элементов на дискретной решетке с центральной запретной зоной**

(линии отображают интенсивность взаимодействий между компонентами согласно заданной матрице связности)

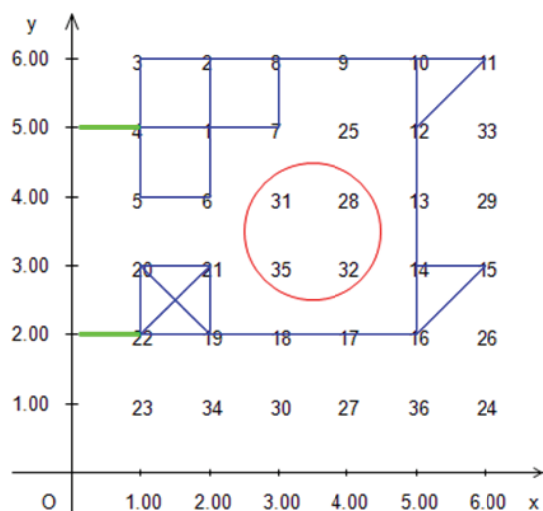


**Рис. 2. Финальная конфигурация после гибридной оптимизации**  
(соблюдены геометрические ограничения, связи укорочены)

k = 101 fmin = 839.33 fmin0 = 756.00 i = 1 fm1 = 756.00 fm2 = 756.00  
k = 202 fmin = 1004.07 fmin0 = 755.49 i = 2 fm1 = 755.49 fm2 = 755.49  
k = 303 fmin = 838.09 fmin0 = 755.49 i = 3 fm1 = 755.49 fm2 = 755.49  
k = 404 fmin = 840.57 fmin0 = 754.25 i = 4 fm1 = 754.25 fm2 = 754.25  
k = 606 fmin = 763.23 fmin0 = 753.84 i = 1 fm1 = 753.84 fm2 = 753.84  
k = 707 fmin = 839.74 fmin0 = 753.84 i = 2 fm1 = 753.84 fm2 = 753.84  
k = 808 fmin = 840.16 fmin0 = 753.84 i = 3 fm1 = 753.84 fm2 = 753.84  
k = 909 fmin = 839.33 fmin0 = 753.84 i = 4 fm1 = 753.84 fm2 = 753.84

Result: Shtraf = 0 fopt = 753.835569799683

**Рис. 3. Пример динамики изменения целевой функции**  
**и лучшего найденного значения при мультистартовой оптимизации**



**Рис. 4. Оптимальное размещение при круговой запретной зоне**  
(алгоритм эффективно обходит препятствие, минимизируя удлинение маршрутов)

Наблюдалась устойчивость поведения при смене начальных приближений: траектории сходимости сходны по форме, а итоговые значения функционала мало отличаются (рис. 5). Временные показатели зависят от структуры связности и параметров штрафов; в пределах исследованных инстансов обеспечивается приемлемое время вычислений.

**Пример В** (гетерогенные элементы). Рассматривалось размещение разногабаритных компонентов: точечных (1×1), линейных (3×1, 1×3) и блочных (2×2). Геометрическая гетерогенность сокращает число допустимых конфигураций и усложняет локальный поиск из-за проверки пересечений (рис. 6).

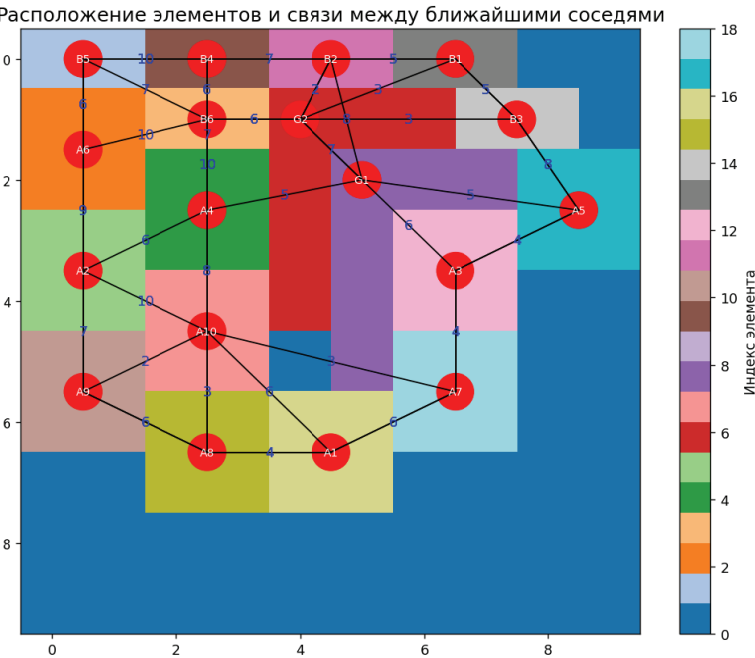
```

k = 101 fmin = 4484.68 fmin0 = 3275.68 i = 1 fm1 = 3275.68 fm2 = 3275.68
k = 202 fmin = 3650.14 fmin0 = 3275.68 i = 2 fm1 = 3275.68 fm2 = 3275.68
k = 303 fmin = 5130.70 fmin0 = 3275.68 i = 3 fm1 = 3275.68 fm2 = 3275.68
k = 404 fmin = 3774.16 fmin0 = 3273.10 i = 4 fm1 = 3273.10 fm2 = 3273.10
k = 606 fmin = 4317.71 fmin0 = 3273.10 i = 1 fm1 = 3273.10 fm2 = 3273.10
k = 707 fmin = 3658.00 fmin0 = 3273.10 i = 2 fm1 = 3273.10 fm2 = 3273.10
k = 808 fmin = 5245.80 fmin0 = 3272.69 i = 3 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 909 fmin = 3798.10 fmin0 = 3272.69 i = 4 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1111 fmin = 5845.54 fmin0 = 3272.69 i = 1 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1212 fmin = 3783.44 fmin0 = 3272.69 i = 2 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1313 fmin = 3600.53 fmin0 = 3272.69 i = 3 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1414 fmin = 3479.96 fmin0 = 3272.69 i = 4 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1616 fmin = 4181.75 fmin0 = 3272.69 i = 1 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1717 fmin = 3741.53 fmin0 = 3272.69 i = 2 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1818 fmin = 3684.53 fmin0 = 3272.69 i = 3 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69
k = 1919 fmin = 3400.59 fmin0 = 3272.69 i = 4 fm1 = 3272.69 fm2 = 3272.69

Result: Shtraf=0 fopt=3272.68542494924

```

**Рис. 5. Сравнение траекторий сходимости для стратегий глобального поиска**  
(адаптивная настройка влияет на характер сходимости)



**Рис. 6. Финальное размещение гетерогенных элементов (манхэттенская метрика)**  
(обеспечена компактная кластеризация при сохранении связности составных блоков)

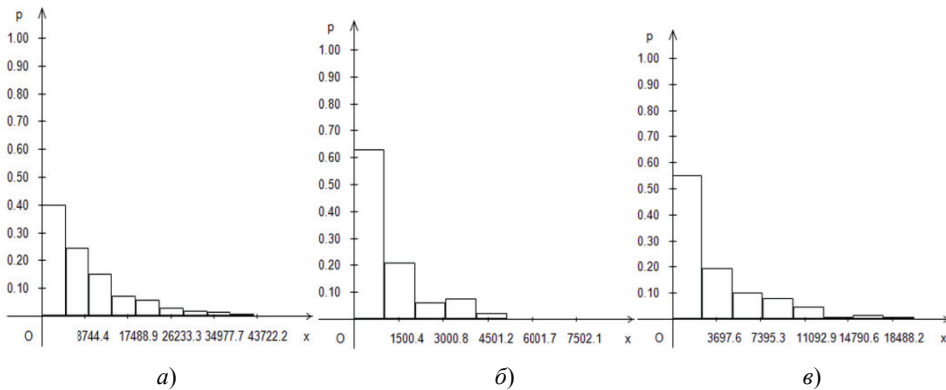
Эксперименты с разногабаритными элементами подтвердили ключевую роль механизма виртуальных связей: недостаточный вес  $\omega$  относительно  $\max r_{pq}$  приводит к риску фрагментации составных элементов. На практике выбирают  $\omega \gg \max r_{pq}$ , что обеспечивает сохранение целостности при умеренном влиянии на оптимизацию.

### Сравнительный анализ

Сопоставление с существующими подходами опирается на обзорные публикации [6, 7]. Рассматриваются классы: точные методы (применимы для малых задач), классические эвристики (быстрые, без гарантий), метаэвристики и гибриды (хорошее соотношение качество/время при корректной настройке).

Форма распределений на рис. 7 соответствует известным тенденциям: усиление локального поиска при корректном глобальном поиске дает более узкие распределения по числу итераций, тогда как чисто стохастические методы демонстрируют длинные хвосты [7].

Сравнительная характеристика основных классов методов оптимизации размещения приведена в табл. 1 [3, 5 – 8].



**Рис. 7. Распределения числа итераций до сходимости для трех алгоритмических схем:**  
*а* – стохастической; *б* – гибридной покоординатной; *в* – роевой

Таблица 1

**Сравнительная характеристика основных классов методов оптимизации размещения**

Методологический класс	Вычислительная сложность	Качество решения	Область применимости
Точные алгоритмы (ILP, B&B)	Экспоненциальная	Глобальный оптимум	Малые задачи
Классические эвристики (SA, TS)	Полиномиальная	Локальный минимум	Малые и средние
Популяционные методы (GA, PSO, ACO)	Полиномиальная (зависит от $P$ , $G$ )	Квазиоптимальное	Средние и крупные
Гибридные подходы	Полиномиальная	Близкое к оптимуму	Широкий диапазон
Предложенный метод	Полиномиальная (инкрементальная)	Гарантированный локальный минимум	Малые и средние

Примечание:  $I$  – число итераций локального поиска;  $P$  – размер популяции (для популяционных методов);  $G$  – число поколений (эволюционные схемы);  $R$  – число рестартов (мультистарт).

## Заключение

Количественные преимущества зависят от набора задач и параметров, то есть корректнее оценивать поведение по классам методов. Точные схемы обеспечивают оптимальность для малых инстансов, но быстро теряют масштабируемость [6]. Классические эвристики (имитация отжига, поиск с запретами) дают стабильные улучшения на средних задачах, однако чувствительны к началу и настройке [7]. Популяционные методы (генетические алгоритмы, рой частиц, муравьиные колонии) демонстрируют хорошую эмпирическую масштабируемость при корректной кодировке ограничений; на практике часто выигрывают гибриды, совмещающие локальный поиск и популяционные идеи [5, 7].

Методы обучения с подкреплением показали потенциал для глобального размещения в микроэлектронике [3], а специализированные постановки встречаются в квантовых системах [8]. В предложенной схеме инкрементальные оценки и адаптация штрафов улучшают практическую эффективность на задачах малой и средней размерности, где особенно важна корректная обработка геометрических ограничений.

Ключевые факторы эффективности: баланс локального усиления и глобального поиска при адаптивном управлении параметрами. На старте улучшения часты; по мере стабилизации они редуют. Адаптация штрафов удерживает баланс между исследованием и улучшением текущего решения.

Инкрементальные оценки ускоряют локальные операции в 3 – 5 раз относительно полного пересчета; время выполнения согласуется с оценкой  $O(n)$  на итерацию. В интервале  $\rho \in [1, 1; 2, 0]$  метод работает стабильно; влияние начальных штрафов снижается за счет автокоррекции.

Метод дополняет подходы обучения с подкреплением [3]: обучение с подкреплением эффективно на повторяющихся структурах, гибридный локальный поиск – на уникальных конфигурациях и малых выборках. Ограничения: при высокой плотности матрицы  $R$  выигрыш от инкрементальных оценок снижается; в трехмерном случае растут требования к памяти; параллелизация рестартов дает ускорение до 8 – 10 потоков.

Суммарная оценка показала, что разработанная методология гибридного по координатного поиска для дискретного размещения с геометрическими ограничениями обеспечивает практический баланс между качеством решения и вычислительной стоимостью. Задача формализована как обобщенная квадратичная проблема назначений с адаптивными штрафами; инкрементальные вычисления ускоряют локальные операции относительно полного пересчета, а доказанные свойства локальной сходимости и вероятностного достижения глобального оптимума при мультистарте согласуются с экспериментальными наблюдениями. Для задач размерности  $6 \times 6$  время решения составляет 2 – 5 мин при типовых ресурсах.

Метод стабилен к выбору стартов за счет мультистарта и адаптивных штрафов. Упорядоченная обработка пар в ряде тестов снижает число итераций по сравнению со случайным порядком; величина эффекта зависит от структуры связности и настроек, требуется статистическая проверка на расширенных наборах задач.

Для малых и средних инстансов достигается приемлемое время вычислений при сохранении качества. При росте плотности матрицы связей снижается выигрыш от инкрементальных оценок, целесообразно усиливать диверсификацию и применять более информативный выбор порядка локальных шагов с учетом вклада элементов в целевую функцию.

В трехмерных конфигурациях возрастают требования к памяти, а чувствительность к параметрам штрафов наиболее заметна на ранних этапах оптимизации.

ции. Практически оправдана калибровка начальных штрафов и контроль их динамики в привязке к профилям нарушений ограничений.

Приоритетными направлениями развития видятся автоматическая настройка параметров (в том числе на основе метаоптимизации), параллельная и распределенная организация рестартов, гибридизация с популяционными методами для усиления глобального поиска, а также адаптивная стратификация пространства обменов и порядка локальных шагов.

#### *Список литературы*

1. Progress of placement optimization for accelerating VLSI physical design / Y. Qiu, Y. Xing, X. Zheng, P. Gao, S. Cai, X. Xiong // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, No. 2. – P. 337. doi: 10.3390/electronics12020337
2. Garey, M. R. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness* / M. R. Garey, D. S. Johnson. – San Francisco : W. H. Freeman, 1979. – 338 p.
3. A graph placement methodology for fast chip design / A. Mirhoseini, A. Goldie, M. Yazgan [et al.] // *Nature*. – 2021. – Vol. 594, No. 7862. – P. 207 – 212. doi: 10.1038/s41586-021-03544-w
4. GORDIAN: VLSI placement by quadratic programming and slicing optimization / J. M. Kleinhans, G. Sigl, F. M. Johannes, K. J. Antreich // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. – 1991. – Vol. 10, No. 3. – P. 356 – 365. doi: 10.1109/43.67789
5. Shahookar, K. *VLSI cell placement techniques* / K. Shahookar, P. Mazumder // *ACM Computing Surveys*. – 1991. – Vol. 23, No. 2. – P. 143 – 220. doi: 10.1145/103724.103725
6. Application component placement in NFV-based hybrid cloud/fog systems with mobile fog nodes / C. Mouradian, S. Kianpisheh, M. Abu-Lebdeh, H. Ebrahimnezhad, R. H. Glietho, P. Polakos // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2019. – Vol. 37, No. 5. – P. 1130 – 1143. doi: 10.1109/JSAC.2019.2906790
7. Comparative study between exact and metaheuristic approaches for virtual machine placement / S. El Motaki, A. Yahyaouy, H. Gualous, J. Sabor // *The Journal of Supercomputing*. – 2019. – Vol. 75, No. 10. – P. 6239 – 6259. doi: 10.1007/s11227-019-02847-0
8. Qplacer: Frequency-aware component placement for superconducting quantum computers / J. Zhang, H. Wang, Q. Ding, [et al.] // *arXiv:2401.17450*. – 2024.
9. Быковский, Н. В. Модификации методов моделирования электронных цепей со стохастическими параметрами / Н. В. Быковский, С. А. Некрасов, О. В. Шестопал // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2025. – № 2(226). – С. 12 – 19. doi: 10.17213/1560-3644-2025-2-12-19
10. Быковский, Н. В. Оптимизация размещения элементов нерегулярной формы на многомерном поле сложной топологии с использованием комбинаторного аналога покоординатного спуска и мултистарта / Н. В. Быковский, Р. В. Арутюнян // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2024. – № 4(224). – С. 17 – 27. doi: 10.17213/1560-3644-2024-4-17-27
11. Быковский, Н. В. Оптимизация размещения разногабаритных элементов на коммутационном поле сложной топологии на основе комбинаторного аналога метода Гаусса–Зейделя / Н. В. Быковский, С. А. Некрасов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2025. – № 1(225). – С. 19 – 28. doi: 10.17213/1560-3644-2025-1-19-28

12. Bykovsky, N. V. A combinatorial approach to optimizing the placement of irregularly shaped elements on two-dimensional and three-dimensional switching fields with complex topology / N. V. Bykovsky, R. V. Harutyunyan, A. V. Nasedkin // T-Comm. – 2024. – Vol. 18, No. 10. – P. 44 – 54. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-44-54

13. Bykovsky, N. V. Numerical modeling and optimization results for the placement of irregularly shaped elements on a multidimensional switching field with complex topology / N. V. Bykovsky, R. V. Harutyunyan, A. V. Nasedkin // T-Comm. – 2024. – Vol. 18, No. 9. – P. 48 – 54. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-48-54

14. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с.

15. Абас, В. М. А. Численные методы и алгоритмы решения задачи квадратичного назначения и их применение при объемно-планировочном проектировании производства / В. М. А. Абас, С. Я. Егоров // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 412 – 427. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.412-427

16. Егоров, С. Я. Прототип экспертной системы компоновки промышленных объектов / С. Я. Егоров, К. А. Шаронин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 268 – 276.

---

## Hybrid Coordinate Descent for Discrete Placement of Multi-Sized Components

R. V. Harutyunyan<sup>1</sup>, S. Ya. Egorov<sup>2</sup>, S. A. Nekrasov<sup>3</sup>, N. V. Bykovsky<sup>4</sup>✉

*Department of Mathematical Cybernetics and Information Technology (1),  
Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia;*

*Department of Computer Integrated Systems in Mechanical Engineering (2),  
TSTU, Tambov, Russia;*

*Departments: Applied Mathematics (3),*

*Physics and Photonics (4), back\_of\_sky@bk.ru;*

*M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia*

**Keywords:** adaptive hybridization; discrete spaces; incremental computation; quadratic assignment problem; combinatorial optimization; multi-start diversification; placement of different-sized elements.

**Abstract:** This paper addresses the *NP*-hard combinatorial optimization problem of discrete placement for multi-sized components under complex geometric constraints. To solve this, a novel hybrid scheme is proposed, which combines a modified coordinate descent for local search with multi-start diversification for exploring the global solution space. The mathematical model is formalized as a generalized quadratic assignment problem where constraints on non-overlapping, forbidden zones, and the connectivity of composite components are handled through a system of adaptive penalty functions. A key element ensuring computational efficiency is the use of incremental evaluations, which allows for recalculating the change in the objective function during local steps (pairwise swaps) in linear time,  $O(n)$ . The methodology was empirically validated on a set of representative small- and medium-sized problems, including simulations of printed circuit board layouts with arbitrarily shaped forbidden regions.



The results of numerical experiments confirmed the algorithm's high stability with respect to initial approximations and its correct handling of heterogeneous components. It is shown that the hybrid scheme provides faster and more stable convergence compared to classical stochastic approaches. The developed software implementation supports both two-dimensional and three-dimensional discrete grids and various distance metrics. Finally, the limitations of the method are formulated, and directions for its future development are outlined.

### References

1. Qiu Y., Xing Y., Zheng X., Gao P., Cai S., Xiong X. Progress of placement optimization for accelerating VLSI physical design, *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 337. doi: 10.3390/electronics12020337
2. Garey M.R., Johnson D.S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, San Francisco: W.H. Freeman, 1979, 338 p.
3. Mirhoseini A., Goldie A., Yazgan M., [et al.], A graph placement methodology for fast chip design, *Nature*, 2021, vol. 594, no. 7862, pp. 207-212. doi: 10.1038/s41586-021-03544-w
4. Kleinhans J.M., Sigl G., Johannes F.M., Antreich K.J. GORDIAN: VLSI placement by quadratic programming and slicing optimization, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1991, vol. 10, no. 3, pp. 356-365. doi: 10.1109/43.67789
5. Shahookar K., Mazumder P. VLSI cell placement techniques, *ACM Computing Surveys*, 1991, vol. 23, no. 2, pp. 143-220. doi: 10.1145/103724.103725
6. Mouradian C., Kianpisheh S., Abu-Lebdeh M., Ebrahimnezhad H., Glitho R.H., Polakos P. Application component placement in NFV-based hybrid cloud/fog systems with mobile fog nodes, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 1130-1143. doi: 10.1109/JSAC.2019.2906790
7. El Motaki S., Yahyaouy A., Gualous H., Sabor J. Comparative study between exact and metaheuristic approaches for virtual machine placement, *The Journal of Supercomputing*, 2019, vol. 75, no. 10, pp. 6239-6259. doi: 10.1007/s11227-019-02847-0
8. Zhang J., Wang H., Ding Q., [et al.], Qplacer: Frequency-aware component placement for superconducting quantum computers, arXiv:2401.17450. 2024.
9. Bykovsky N.V., Nekrasov S.A., Shestopal O.V. [Modifications of methods for modeling electronic circuits with stochastic parameters], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian region. Technical Sciences], 2025, no. 2(226), pp. 12-19. doi: 10.17213/1560-3644-2025-2-12-19 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Bykovsky N.V., Arutyunyan R.V. Optimization of the placement of irregularly shaped elements on a multidimensional field with complex topology using a combinatorial analogue of coordinate descent and multistart, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian region. Technical Sciences], 2024, no. 4(224), pp. 17-27. doi: 10.17213/1560-3644-2024-4-17-27 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Bykovsky N.V., Nekrasov S.A. Optimization of the placement of multi-sized elements on a switching field with complex topology based on a combinatorial analogue of the Gauss-Seidel method, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian region. Technical Sciences], 2025, no. 1(225), pp. 19-28. doi: 10.17213/1560-3644-2025-1-19-28 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Bykovsky N.V., Harutyunyan R.V., Nasedkin A.V. A combinatorial approach to optimizing the placement of irregularly shaped elements on two-dimensional and

three-dimensional switching fields with complex topology, *T-Comm*, 2024, vol. 18, no. 10, pp. 44-54. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-44-54

13. Bykovsky N.V., Harutyunyan R.V., Nasedkin A.V Numerical modeling and optimization results for the placement of irregularly shaped elements on a multidimensional switching field with complex topology, *T-Comm*, 2024, vol. 18, no. 9, pp. 48-54. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-48-54

14. Krasnyansky M.N., Mokrozub V.G., Nemtinov V.A. [et al.], *Tsifrovoye mashinostroyeniye* [Digital Engineering], Tambov: Tambov State Technical University, 2023, 266 p. (In Russ.)

15. Abas V.M.A., Egorov S.Ya. [Numerical methods and algorithms for solving the quadratic assignment problem and their application in space-planning design of production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 412-427. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.412-427 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Egorov S.Ya., Sharonin K.A. [Prototype of an expert system for the layout of industrial facilities], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 268-276. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### Hybrid-Koordinatenabstieg für die diskrete Platzierung von Elementen verschiedener Größe

**Zusammenfassung:** Diese Arbeit befasst sich mit einem *NP*-schweren kombinatorischen Optimierungsproblem: der diskreten Platzierung von Elementen unterschiedlicher Größe unter komplexen geometrischen Nebenbedingungen. Zur Lösung dieses Problems ist ein neuartiges Hybridverfahren vorgeschlagen, das modifiziertes Koordinatenabstiegsverfahren für die lokale Suche mit Multi-Start-Diversifizierung zur Erkundung des globalen Lösungsraums kombiniert. Das mathematische Modell ist als verallgemeinertes quadratisches Zuordnungsproblem formalisiert, wobei Nebenbedingungen wie Nichtüberschneidung, Sperrzonen und Konnektivität der Elemente durch ein System adaptiver Strafkostenfunktionen berücksichtigt werden. Ein Schlüsselement für die Recheneffizienz ist die Verwendung inkrementeller Schätzungen, die es ermöglichen, die Änderung der Zielfunktion in lokalen Schritten (paarweiser Austausch) in linearer Zeit  $O(n)$  neu zu berechnen. Die empirische Validierung der Methodik erfolgt anhand einer Reihe repräsentativer klein- und mitteldimensionaler Probleme, darunter die Modellierung des Layouts von Leiterplatten mit Sperrzonen beliebiger Form. Die Ergebnisse numerischer Experimente bestätigen die hohe Robustheit des Algorithmus gegenüber der Wahl der Anfangsnäherungen und die korrekte Behandlung heterogener Elemente. Es ist gezeigt, dass das Hybridverfahren im Vergleich zu klassischen stochastischen Ansätzen eine schnellere und stabilere Konvergenz bietet. Die entwickelte Softwareimplementierung unterstützt sowohl zwei- als auch dreidimensionale diskrete Gitter und verschiedene Distanzmetriken. Die Grenzen der Methode sind formuliert und Möglichkeiten für ihre Weiterentwicklung aufgezeigt.

---

### Descente au repos hybride pour le placement discret des éléments de différentes dimensions

**Résumé:** Est examinée une tâche *NP*-difficile d'optimisation combinatoire – le placement discret des éléments de différentes dimensions en tenant compte des contraintes géométriques complexes. Pour sa résolution est proposé un schéma d'interface graphique original qui combine une descente au repos modifiée pour la

recherche locale et une diversification multistart pour l'exploration de l'espace de décision global. Le modèle mathématique est formalisé comme un problème quadratique généralisé sur les affectations où les contraintes de la non-réception, les zones interdites et la connectivité des éléments constitutifs sont prises en compte par un système des fonctions adaptative punitives. L'élément clé de l'efficacité de calcul est l'utilisation d'estimations incrémentales ce qui permet de recalculer la variation de la fonction cible dans les étapes locales (échanges par paires) en temps linéaire  $O(n)$ . La validation empirique de la méthodologie est réalisée sur un ensemble de tâches représentatives de la petite et moyenne dimension, y compris la modélisation de la disposition des cartes de circuits imprimés avec des zones restreintes de forme libre. Les résultats des expériences numériques ont confirmé la grande stabilité de l'algorithme au choix des approximations initiales et le traitement correct des éléments hétérogènes. Est démontré que le circuit hybride permet une convergence plus rapide et plus stable par rapport aux approches stochastiques classiques. L'implémentation logicielle développée prend en charge les réseaux discrets bidimensionnels et tri-dimensionnels et diverses mesures de distance. Les limites de la méthode sont formulées et les voies de son développement ultérieur sont tracées.

---

**Авторы:** *Арутюнян Роберт Владимирович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Математическая кибернетика и информационные технологии», ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», Москва, Россия; *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Некрасов Сергей Александрович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика»; *Быковский Никита Васильевич* – аспирант кафедры «Физика и фотоника», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова», Новочеркасск, Россия.

## ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИАЛОГОВОЙ ПРОЦЕДУРЫ ВЫБОРА НАИЛУЧШЕГО РЕШЕНИЯ

А. В. Литвицкая✉

*Кафедра «Высшая математика», alexandralitvickaya@yandex.ru,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** лицо, принимающее решение; многоуровневая модель; принятие решений; степень превосходства; человеко-машинная процедура.

**Аннотация:** Предложен общий подход к построению модели конечной задачи принятия решений (ПР) для случая векторного отношения предпочтения на множестве возможных решений. Введено понятие степени превосходства между решениями. На ее основе построена  $l$ -уровневая модель ПР и определено решающее правило в виде человеко-машинной процедуры ( $l$ -правило). Исследовано свойство бинарных отношений предпочтений на множестве возможных решений.

---

### Введение

Особое место в теории принятия решений (ПР) занимают задачи, в которых каждое решение характеризуется некоторым набором параметров [1]. Без ограничения общности можно говорить об этих задачах как о многокритериальных. Параметры при этом выступают в качестве критериев эффективности. Каждый критерий задает на множестве возможных решений бинарное отношение предпочтения [2]. Совокупность таких отношений предпочтения образует векторное отношение предпочтения, в соответствии с которым должно быть выбрано наилучшее решение [3].

При проведении исследований в области принятия решений теоретические (формальные) и экспериментальные (неформальные) методы выступают на равных правах [4]. Эксперимент позволяет сформулировать положения и гипотезы, на основе которых строится формальная математическая модель – аналитическая или программно реализованная на ЭВМ. Задание параметров решений и определения отношения предпочтения осуществляется в результате проведения экспертного опроса и на основе обработки полученных при этом данных [5].

В связи с этим актуальной проблемой теории принятия решений является разработка моделей и процедур, совмещающих в себе формальные и неформальные стороны [6]. При этом формальная часть может быть реализована в виде соответствующих программ для ЭВМ, а неформальная обеспечивается включением в процедуру непосредственно эксперта – лица, принимающего решения (ЛПР). Соответствующие процедуры называются человеко-машинными процедурами ПР, которые позволяют устранить недоверие к решению, выработанному ЭВМ, так как выбор окончательного решения предоставляется ЛПР, которое руководствуется при этом характеристиками, рассчитанными ЭВМ, а также своими неформализуемыми соображениями [7].

*Цель работы* – исследование свойств бинарных отношений предпочтений на множестве возможных решений.

### Степень превосходства между решениями

Обозначим через  $H$  класс кососимметричных скалярных функций двух аргументов

$$H = \{\varphi(x_i, x_j) : \forall x_i, x_j \in H \quad \varphi(x_i, x_j) = -\varphi(x_j, x_i)\},$$

где  $\varphi$  – процедура измерения, сохраняющая определенный тип шкалы для критерия.

Рассмотрим пару решений  $x_i$  и  $x_j$  из множества  $X$ . В зависимости от модели конкретной задачи есть та или иная информация об этих решениях: предпочтения группы экспертов, наборы значений векторного критерия эффективности, значения оценочной функции для различных состояний «природы» и т.д. [2].

Скалярную функцию  $\Phi(x_i, x_j)$ , определенную на множестве пар решений на  $X$ , назовем степенью превосходства (СП) решения  $x_i$  над решением  $x_j$ , если  $\Phi \in H$ .

Из определения СП следует

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \Phi(x_i, x_j) = 0,$$

где  $m$  – число возможных решений в  $X$ .

Пусть информация о решениях задана в виде векторного отношения предпочтения  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ . Степень превосходства решения  $x_i$  над  $x_j$ , соответствующую набору  $R$ , будем вычислять следующим образом [3]. Для каждой пары  $(x_i, x_j) \in X$  и отношения  $R_v \in R$  ( $v = \overline{1, n}$ ) определим числа

$$\delta_v(x_i, x_j) = \begin{cases} p_v(x_i, x_j), & (x_i, x_j) \in R_v^S, \\ 0, & (x_i, x_j) \in R_v^S, \\ -p_v(x_i, x_j), & (x_j, x_i) \in R_v^S, \end{cases}$$

где  $p_v(x_i, x_j)$  определяется в зависимости от уровня использования информации.

Будем различать три уровня использования информации:

1) мажоритарный – информация о решениях задана и используется в шкалах на порядок ниже;

2) используется информация о различной важности частных отношений предпочтения из выбора  $R$ , заданная в виде коэффициентов важности  $\lambda_v, v = \overline{1, n}$ .

Как правило,  $\lambda_v \geq 0$ ,  $\sum_{v=1}^m \lambda_v = 1$ ;

3) количественная информация о решениях задана в виде функций  $\varphi_v$ , измеренных в интегральных шкалах или в шкалах разностей, и имеется информация о важности отношений предпочтения  $\lambda_v, v = \overline{1, n}$ .

В соответствии с уровнем использования информации, величины  $p_v(x_i, x_j)$  принимают значения:

- 1)  $p_v(x_i, x_j) = 1$  для I уровня;
- 2)  $p_v(x_i, x_j) = \lambda$  для II уровня;
- 3)  $p_v(x_i, x_j) = \lambda_v[\varphi_v(x_i) - \varphi_v(x_j)]$  для III уровня.

За степень превосходства решения  $x_i$  над  $x_j$  примем величину

$$\Phi(x_i, x_j) = \frac{\sum_{v=1}^n \delta_v(x_i, x_j)}{\sum_{v=1}^n |\delta_v(x_i, x_j)|}. \quad (1)$$

В случае возникновения неопределенности  $\frac{0}{0}$  считаем  $\Phi(x_i, x_j) = 0$ .

Степень превосходства, определенная таким образом, удовлетворяет следующим свойствам:

- 1)  $\Phi(x_i, x_j) = -\Phi(x_j, x_i)$ ,  $\Phi \in H$ , то есть является в действительности СП по определению;
- 2)  $-1 \leq \Phi(x_i, x_j) \leq 1$  для всех  $(x_i, x_j) \in X$ ;
- 3)  $\Phi(x_i, x_j) = 1 \Leftrightarrow (x_i, x_j) \in R_k^S$ ,  $\Phi(x_j, x_i) = -1 \Leftrightarrow (x_j, x_i) \in R_k^S$ .

### Отношение предпочтения уровня на множестве возможных решений

При помощи СП введем бинарное отношение, определенное на множестве возможных решений,

$$R(l) = \{(x_i, x_j) \in E : \Phi(x_i, x_j) \geq l, 0 \leq l \leq 1\}.$$

Назовем его отношением предпочтения уровня  $l$ . Величина  $l$  определяется в зависимости от специфики задачи. Более подробно выбор уровня будет обсуждаться далее.

Так, постоянное отношение  $R(l)$  удовлетворяет свойствам антисимметричного метризованного отношения

$$\overline{R(l)} = \langle R(l), W(R(l)) \rangle,$$

где  $W(R(l))$  – матрица метризованного отношения  $R(l)$ , представляющая собой совокупность значений степени превосходства для всех пар решений из  $X$  [4].

Заметим, что метризованные отношения содержат сведения о степени предпочтения объектов и сходства между ними.

Обратное к  $R(l)$  отношение определяется как

$$R(l)^{-1} = \{(x_i, x_j) \in E : \Phi(x_i, x_j) \leq -l, 0 \leq l \leq 1\}.$$

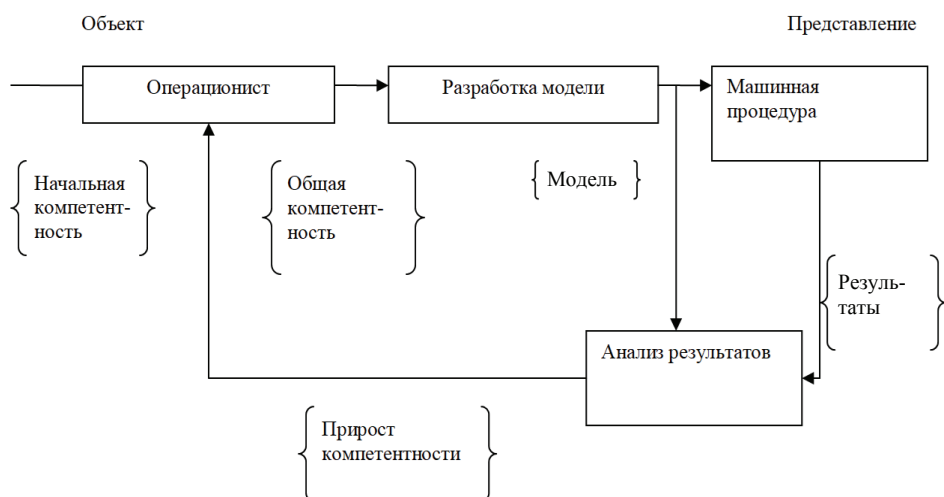
Множество  $O = E \setminus (R(l) \cup R(l)^{-1})$  образуется из несравнимых в отношении  $R(l)$  решений. Нетрудно показать, что  $R(l)$  – свертка для векторного отношения  $X$ .

**Теорема 1.** Отношение  $R(l)$  эффективно

$$R(l) \geq R_k, \forall 0 \leq l \leq 1.$$

*Доказательство.* Пусть  $\langle X, R \rangle$ , при этом  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ . Они являются связными (рис. 1).

Положим, что имеются решения задач ПР, для которых на множестве  $X$  определен набор отношений  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ , который будем называть векторным



**Рис. 1. Блок-схема, описывающая связи между объектом исследования и его представлением**

отношением  $R_v \in R \left( v = \overline{1, n} \right)$  предпочтения. Каждое частное отношение предпочтения представляет собой  $R_v(A, I)$ . В такой постановке на основе одного подхода могут быть изучены три типа задач ПР: многокритериальные, группового выбора и при неопределенности и риске [3].

Известно, что сверткой отношений  $R_v \left( v = \overline{1, n} \right)$  является любое отношение

$$R^+ \leq \bigcup_{v=1}^n R_v = R_k.$$

Для данного неравенства каждая компонента вектора  $R^+$  меньше либо равна соответствующей компоненте, принадлежащей множеству  $R_v$  или множеству  $R_k$ .

Свертка эффективная, если

$$R^+ \geq \bigcap_{v=1}^n R_v = R_k, \quad (2)$$

где  $R_k$  – отношение Парето доминирования для векторного отношения предпочтения  $\{R_v\}_{v=\overline{1, n}}$  [1].

Отметим, что в неравенстве (2) каждая компонента вектора  $R^+$  больше либо равна соответствующей компоненте, принадлежащей и множеству  $R_v$ , и множеству  $R_k$ .

Отношение  $R_k$  выражается через частное отношение по формуле (2).

Для доказательства теоремы покажем, что

$$R^S(I) \supseteq R_k^S.$$

Пусть пара решений  $(x_i, x_j) \in E$  принадлежит  $R_k^S$ .



Тогда для этой пары  $\Phi(x_i, x_j)=1$  по свойству 3), то есть  $(x_i, x_j) \in R(l)^S$ ,  $\forall 0 \leq l \leq 1$ . Следовательно,  $R_k^S \subseteq R^S(l)$ , что и требовалось доказать.

**Следствие 1.**  $R(1) = R_k^S$ .

*Доказательство.* Этот факт непосредственно следует из определения отношения предпочтения уровня  $l$  и свойства 3) СП.

**Следствие 2.**  $R(0) = R_k^S$ .

В частном случае СП может строиться на основании одного единственного отношения предпочтения. Тогда теорема 1 дает следующий результат.

**Утверждение 1.** Пусть имеется  $\langle X, R \rangle$ , где  $X$  – конечное множество возможных решений,  $R$  – квазипорядок, определенный на  $X$ . Будем считать, что  $R$  полное. Тогда для всех  $l \in [0,1]$   $R(l) \geq R$ , где  $R(l)$  – отношение предпочтения уровня  $l$ , определенное на основе  $R$  [5].

Следует показать, что отношение  $R$  необходимо продолжить на  $X$  до отношения  $R'$ , то есть так, чтобы

$$R' \supseteq R, (R')^S \supseteq R^S, (R')^S \subseteq R^S.$$

Метризованное отношение  $\hat{P} = \langle P, W(P) \rangle$  называется аддитивным, если  $P$  транзитивно:  $[(x_i, x_r) \in P, (x_r, x_j) \in P] \Rightarrow (x_i, x_j) \in P$ , и одновременно для соответствующих элементов матрицы  $W(P)$  выполняется условие аддитивности:  $w_{ir} + w_{rj} = w_{ij}$  [4].

Обозначим через  $T$  класс скалярных функций, определенных на некотором множестве  $E$  и удовлетворяющих условию аддитивности:

$$T = \{ \varphi(x_i, x_j) : \forall x_i, x_j, x_r \in X : \varphi(x_i, x_r) + \varphi(x_r, x_j) = \varphi(x_i, x_j) \}. \quad (3)$$

**Теорема 2.** Пусть имеем  $R(l)$ . Если  $\Phi \in T$ , то  $R(l)$  транзитивно и, следовательно,  $\hat{R}(l)$  является аддитивным метризованным отношением.

*Доказательство.* Транзитивность отношения  $R(l)$  означает следующее:  $\forall x_i, x_j, x_k \in X$  :  $(x_i, x_k) \in R(l), (x_k, x_j) \in R(l) \Rightarrow (x_i, x_j) \in R(l)$ , :  $\Phi(x_i, x_k) \geq l$ ,  $\Phi(x_k, x_j) \geq l \Rightarrow \Phi(x_i, x_j) \geq l$ , но из условия  $\Phi \in T$  следует  $\Phi(x_i, x_k) + \Phi(x_k, x_j) = \Phi(x_i, x_j)$ . Следовательно,  $\Phi(x_i, x_j) \geq 2l$  и тем более,  $\Phi(x_i, x_j) \geq l$ , так как  $l \geq 0$  и, следовательно,  $(x_i, x_j) \in R(l)$ , что и требовалось доказать.

**Следствие 3.** Если  $\Phi \in T$ , то  $R(l)$  – строгий частичный порядок при  $l \neq 0$ .

*Доказательство.* По определению строгого порядка для  $R(l)$  необходимо доказать его транзитивность и антирефлексивность. Транзитивность  $R(l)$  следует из теоремы 2, а антирефлексивность и несвязность вытекает из самого определения  $R(l)$ .

**Следствие 4.** Если  $\Phi \in T$ , то  $R(0)$  – линейный квазипорядок.

*Доказательство.* Утверждения следствия непосредственно следует из теоремы 2.  $R(0)$  является линейным, так как  $\forall x_i, x_j, x_k \in X$ . Степень превосходства либо положительна, либо отрицательна. Если СП равна 0, то будем полагать, что решения равноценны.

**Следствие 5.** Если  $\Phi \in T$ , то отношение

$$Q(0) = \{(x_i, x_j) \in E : \Phi(x_i, x_j) = 0\}$$

является отношением эквивалентности на  $X$  и в силу этого образует разбиение множества  $X$  на классы эквивалентности (фактор-множество  $X \setminus Q(0)$ ).

*Доказательство.* Рефлексивность и симметричность отношения  $\Phi(0)$  следует из свойств СП, транзитивность – следствие теоремы 2.

**Утверждение 2.** Для степени превосходства, определенной с помощью III уровня использования информации ( $p_v(x_i, x_j) = \lambda_v[\phi_v(x_i) - \phi_v(x_j)]$ ),

$$\Phi \in T.$$

*Доказательство.* Непосредственная подстановка  $p_v(x_i, x_j)$  в формулу (1) дает результат

$$\Phi(x_i, x_j) = \frac{\sum_{v=1}^n \lambda_v [\phi_v(x_i) - \phi_v(x_j)]}{\sum_{v=1}^n |\lambda_v [\phi_v(x_i) - \phi_v(x_j)]|}.$$

Подставив данное выражение в свойство 3), определяющее класс  $T$ , путем несложных преобразований получим справедливость утверждения.

**Теорема 3.** Для двух величин уровней  $l_1$  и  $l_2$ , таких что  $l_1 > l_2$ , соответствующие отношения предпочтения являются вложенными в следующем порядке

$$R(l_1) \leq R(l_2).$$

*Доказательство.* По определению отношения предпочтения уровня  $l$  получаем:

$$R(l_1) = \{(x_i, x_j) \in E : \Phi(x_i, x_j) \geq l_1\},$$

$$R(l_2) = \{(x_i, x_j) \in E : \Phi(x_i, x_j) \geq l_2\}.$$

Для пары решений  $(x_i, x_j) \in E$  отношение  $x_i R^S(l_1) x_j : \Phi(x_i, x_j) > l_1$ . Так как по условию теоремы  $l_1 > l_2$ , то тем более  $\Phi(x_i, x_j) \geq l_2$  и  $(x_i, x_j) \in R^S(l_2)$ , то есть  $R^S(l_1) \subseteq R^S(l_2)$ , и по определению вложенных отношений это означает, что  $R(l_1) \leq R(l_2)$ , что и требовалось доказать.

### Заключение

Построена модель для конечных задач ПР, в которых информация о решениях задана векторным отношением предпочтения. На основании  $l$ -уровневой модели разрабатывается решающее правило, представленное в виде человеко-машинной процедуры ( $l$ -правило). Исследована задача построения функции полезности на множестве всех решений с использованием понятия степени превосходства между решениями. Человеко-машинная процедура дает единый подход для решения трех классов задач ПР: многокритериальных, группового выбора и задач ПР при неопределенности и риске.

### Список литературы

1. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – Москва : Наука, 1982. – 256 с.

2. Розен, В. В. Математические модели принятия решений в экономике / В. В. Розен. – Москва : Университет, Высшая школа, 2002. – 288 с.
  3. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В. Д. Ногин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 176 с.
  4. Гантмахер, Ф. П. Теория матриц / Ф. П. Гантмахер. – М. : Наука, 1967. – 576 с.
  5. Грунина, Г. С. Решение многокритериальных задач оптимизации в условиях качественной неопределенности / Г. С. Грунина, Н. П. Деменков, А. А. Евлампиев // Вестник МГТУ. – 1998. – №1. – С. 45 – 53.
  6. Татаринев, Ю. Б. Проблемы оценки эффективности фундаментальных исследований / Ю. Б. Татаринев. – Москва : Наука, 1986. – 227 с.
  7. Юдин, Д. Б. Вычислительные методы принятия решений / Д. Б. Юдин. – Москва : Наука, 1986. – 319 с.
- 

### Construction of a Multilevel Model for the Dialogical Procedure of Selecting the Best Solution

A. V. Litvitskaya✉

*Department of Higher Mathematics, alexandralitvickaya@yandex.ru;  
TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** decision maker; multilevel model; decision making; degree of superiority; human-machine procedure.

**Abstract:** A general approach to constructing a model of a finite decision problem (FP) for the case of a vector preference relation on a set of possible solutions is proposed. The concept of the degree of superiority between solutions is introduced. Based on this approach, an l-level FP model is constructed and a decision rule in the form of a human-machine procedure (l-rule) is defined. The properties of binary preference relations on a set of possible solutions are studied.

#### References

1. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nyye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-Optimal Solutions to Multicriteria Problems], Moscow: Nauka, 1982, 256 p. (In Russ.)
2. Rozen V.V. *Matematicheskiye modeli prinyatiya resheniy v ekonomike* [Mathematical Models of Decision-Making in Economics], Moscow: Universitet, Vysshaya shkola, 2002, 288 p. (In Russ.)
3. Nogin V.D. *Prinyatiye resheniy v mnogokriterial'noy srede: kolichestvennyy podkhod* [Decision-Making in a Multicriteria Environment: A Quantitative Approach], Moscow: FIZMATLIT, 2005, 176 p. (In Russ.)
4. Gantmakher F.P. *Teoriya matrits* [Matrix Theory], Moscow: Nauka, 1967, 576 p. (In Russ.)
5. Grunina G.S., Demenkov N.P., Yevlampiyev A.A. [Solution of multicriteria optimization problems under qualitative uncertainty], *Vestnik MGTU* [Bulletin of Moscow State Technical University], 1998, no. 1, pp. 45-53. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Tatarinov Yu.B. *Problemy otsenki effektivnosti fundamental'nykh issledovaniy* [Problems of Assessing the Effectiveness of Fundamental Research], Moscow: Nauka, 1986, 227 p. (In Russ.)

7. Yudin D.B. *Vychislitel'nyye metody prinyatiya resheniy* [Computational Methods of Decision-Making], Moscow: Nauka, 1986, 319 p.

---

### **Entwicklung eines mehrstufigen Modells für ein Dialogverfahren zur Auswahl der besten Lösung**

**Zusammenfassung:** Es ist ein allgemeiner Ansatz zur Konstruktion eines endlichen Entscheidungsmodells (DMP-Modell) für den Fall einer Vektorpräferenzrelation auf einer Menge möglicher Lösungen vorgeschlagen. Das Konzept des Überlegenheitsgrades zwischen Lösungen ist eingeführt. Basierend auf diesem Ansatz ist ein  $l$ -stufiges DMP-Modell konstruiert und eine Entscheidungsregel in Form einer Mensch-Maschine-Prozedur ( $l$ -Regel) definiert. Es sind die Eigenschaften binärer Präferenzrelationen auf einer Menge möglicher Lösungen untersucht.

---

### **Création d'un modèle multiniveau pour la procédure de sélection de dialogue meilleure solution**

**Résumé:** Est proposée une approche générale pour la construction d'un modèle de problème de décision fini (PD) pour le cas d'une relation vectorielle de préférence sur un ensemble de solutions possibles. Est introduite la notion de la supériorité entre les décisions, basée sur le modèle de  $l$ -niveau de la PD; est définie une règle décisive sous la forme d'une procédure homme-machine ( $l$ -règle). Est étudiée la propriété des relations binaires de préférence sur un ensemble de solutions possibles.

---

**Автор:** *Литвицкая Александра Владимировна* – ассистент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ОРНИТОЛОГИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПОЛЕТОВ

Д. В. Кахановский✉

ФГКВООУ ВО «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков  
имени Героя Советского Союза А. К. Серова», [uava73@bk.ru](mailto:uava73@bk.ru); Краснодар, Россия

**Ключевые слова:** верификация модели; относительная влажность воздуха; пространственный процесс Пуассона; риск столкновения с птицами; ряд Фурье; точка росы; условия внешней среды.

**Аннотация:** Представлены результаты исследования математических моделей и алгоритмов численного прогнозирования возникновения неблагоприятных условий внешней среды. Предложен алгоритмический подход к идентификации параметров регрессионной комбинированной функции риска и группировки независимых переменных. Сделан акцент на разработку модели прогнозирования рисков столкновения воздушных судов с птицами, основанной на применении пространственного процесса Пуассона. Представлены три варианта модели с различной степенью детализации исходных данных. Проведено прогнозирование метеорологических условий, влияющих на возникновение неблагоприятных явлений внешней среды с верификацией результатов.

---

### Введение

Предлагаемые модели базируются на использовании пространственных точечных процессов, в частности пространственного процесса Пуассона, для определения вероятности столкновения воздушного судна (ВС) с птицами с учетом высотного распределения птиц, геометрических параметров воздушного судна и других факторов. Разработанные алгоритмы позволяют оценить вероятность столкновения и рассчитать связанные с этим риски для различных условий выполнения полетов.

### Постановка задачи

#### *Модель и алгоритм прогнозирования рисков столкновения с птицами*

Разработка модели прогнозирования рисков столкновения с птицами в районе аэродрома обусловлена тем, что 74 % всех зарегистрированных столкновений произошли на этапе взлета, набора высоты, снижения и посадки [1]. Пусть  $X \subseteq \mathbb{R}^d$ , при этом  $X$  будет представлять собой  $d$ -мерный прямоугольник или все  $\mathbb{R}^d$ . Точки являются стохастически независимыми, и вероятность количества точек  $N(A)$  в области  $A$  определяется распределением Пуассона [2 – 4]. Пусть

$$\Omega^X = \left\{ \omega - (x_i)_{i=1}^N \subset X, N \in N \cup \{\infty\} \right\} \quad (1)$$

обозначает пространство конфигураций  $X = Y^d$ ,  $d \geq 1$ .

Мера вероятности Пуассона  $P_\sigma$  с интенсивностью  $\rho(x)dx$  на  $X$ :

$$P_\sigma = (\omega^X \in \Omega^X : \omega(A) = n) = e^{(-\sigma|A|)} \frac{(\sigma|A|)^n}{n!}, n \in N. \quad (2)$$

Функция интенсивности  $\rho(x)$  будет постоянной (однородной), то есть  $\rho(x) = \lambda \geq 0, x \in X$ , где  $\lambda > 0$  называется *параметром интенсивности*

$$\sigma|A| = \lambda \int_A dA. \quad (3)$$

Полагаем, что функция интенсивности постоянна, что дает пространственное распределение процесса Пуассона для вероятности  $n$  объектов в ограниченной области  $A$  (с площадью/объемом/и т.д.  $|A|$ ) и функцией интенсивности  $\lambda$  как

$$p_n = P(\omega \in \Omega^X : \omega(A) = n) = \frac{(\lambda|A|)^n}{n!} e^{-\lambda|A|}. \quad (4)$$

Пространство встречи  $|A|$  – объем воздушного пространства вокруг ВС, равный радиусу размаха крыльев и пройденного расстояния, которое ВС пролетает в воздушном пространстве. Распределение вероятности для числа встреч в воздушном пространстве для конкретного  $|A|$  равно

$$p_0 = \{1, 0, 0, \dots, 0\}, \quad (5)$$

где  $p_0 = \{1, 0, 0, \dots, 0\}$  – начальное условие отсутствия (0) столкновений и вероятность  $p_i$ , при которой количество столкновений  $i$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ) является  $(i + 1)$  элементом  $p$ .

Пространственный процесс Пуассона в трехмерном пространстве будет использоваться для определения вероятности удара птицы. Эллипс вокруг ВС имеет большую площадь, чем его лобовая площадь и может быть заменен фактической лобовой площадью для обеспечения более точного расчета (рис. 1) [5 – 7].

Существуют три различные модели, которые можно использовать для определения удара птицы и связанной с ним оценки риска, основываясь на количестве и типе известных входных параметров.

*Вариант 1.* Общая модель взаимодействия. Вероятность встречи для всех птиц в воздушном пространстве рассчитывается с использованием пространственного процесса Пуассона. Такой вариант дает вероятность встречи только с основными параметрами размера воздушного пространства, размера ВС, расстояния до ВС и общего количества известных птиц. Оценка риска, связанная с этим случаем, отсутствует, поскольку процентное соотношение конкретных видов неизвестно.

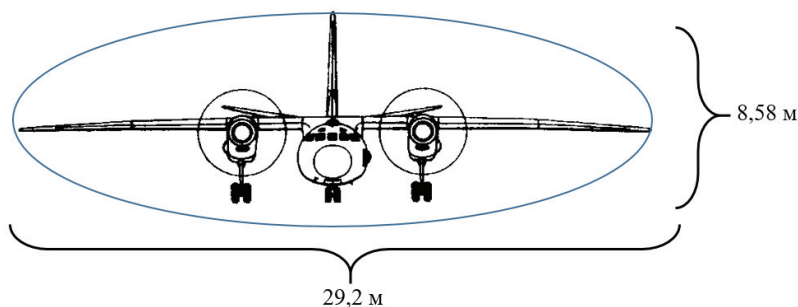


Рис. 1. Эллипс вокруг воздушного судна

*Вариант 2.* Общая модель столкновения с добавленной оценкой риска. Вероятность встречи для конкретного вида птиц рассчитывается с использованием пространственного процесса Пуассона с модифицированным параметром интенсивности  $\lambda^*$

$$p_*(n) = e^{(-\lambda|A|)} \frac{(\lambda|A|)^n}{n!} . \quad (6)$$

Оценка риска (по видам) рассчитывается путем агрегирования по конкретным видам птиц, исключая двойной подсчет

$$R_* = \sum_{n=0}^N np(n)RH_* . \quad (7)$$

Общая оценка риска рассчитывается путем суммирования по всем видам.

Данный вариант модели дает вероятность встречи для каждого конкретного вида и оценку уровня риска.

*Вариант 3.* Общая модель столкновения с оценкой риска для заданного диапазона высот. Этот случай добавляет к набору задач еще один элемент – гамма распределение птиц по высоте. Вероятность встречи в пределах диапазона высот определяется с использованием модифицированного двойным стохастическим процессом параметра интенсивности  $\lambda^*$ :

$$p_{*Alt}(n) = e^{(-\lambda^*Alt|A|)} \frac{(\lambda^*Alt|A|)^n}{n!} . \quad (8)$$

Оценка риска (по видам птиц) рассчитывается аналогично выражению (7) с учетом распределения птиц по высоте

$$R_{*Alt} = \sum_n np_{*Alt}(n)RH_* . \quad (9)$$

Общая оценка риска рассчитывается путем суммирования по всем видам

$$R = \sum R_{*Alt} . \quad (10)$$

Данная модель вычисляет вероятность столкновения (исключая двойной подсчет) и оценку риска для конкретного диапазона высот в рамках общего воздушного пространства. Чтобы стандартизировать оценку риска, необходимо сгенерировать масштабированную оценку риска

$$f(x) = \frac{(b-a)(x - \min(x))}{\max(x) - \min(x)} , \quad (11)$$

где  $b$ ,  $a$  – масштабированные максимум и минимум соответственно;  $\min(x)$ ,  $\max(x)$  – исходные минимум и максимум соответственно.

#### *Исследование модели прогнозирования рисков столкновения с птицами*

Управление рисками при выполнении полетов является неотъемлемым аспектом управления безопасностью процесса подготовки летного состава для информационной системы военного авиационного училища в условиях постоянно изменяющейся воздушной (орнитологической) обстановки. Определим вероятность только одного столкновения с птицами как



$$P_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m}. \quad (12)$$

где  $C_n^m$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $m$ ;  $p^m$ ,  $q^{n-m}$  – вероятности соответственно наступления и не наступления события в одном испытании.

Вероятность нахождения  $n$  птиц в выделенном пространстве

$$W(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{N-n}. \quad (13)$$

Вероятность попадания  $n$  птиц в пространство, занимаемое ВС объемом  $v^*$ ,

$$p = n \frac{v^*}{V}, \quad (14)$$

где  $V$  – общий объем воздушного пространства;  $n$  – среднее число птиц в выделенном пространстве объемом  $v^*$ .

Вероятность хотя бы одного столкновения с птицей

$$P_{1,n} = (1-p)^n. \quad (15)$$

Для вероятности нахождения в области движения воздушного судна, равной 0,20966, производящая функция выглядит следующим образом:

$$\varphi_7 = (0,79034 + 0,20966z)^7.$$

Раскрывая скобки, получим

$$\begin{aligned} \varphi_7 = & 0,19262 + 0,35768z + 0,28466z^2 + 0,12568z^3 + \\ & + 0,033387z^4 + 0,005314z^5 + 0,0004699z^6 + 0,000017808z^7. \end{aligned}$$

Тогда, вероятность хотя бы одного столкновения воздушного судна с птицами для разного количества птиц (0 – 7):

$$\begin{aligned} P_{0,7} = 0,19262; P_{1,7} = 0,35758; P_{2,7} = 0,28466; P_{3,7} = 0,12568; \\ P_{4,7} = 0,033387; P_{5,7} = 0,005314; P_{6,7} = 0,0004699; P_{7,7} = 0,000017808. \end{aligned}$$

Матрица рисков для воздушных судов, в зависимости от количества птиц в пространстве взлета-посадки, представлена в виде табл. 1, которая рассчитывается для каждого календарного месяца года.

Таблица 1

**Матрица рисков для воздушных судов  
в зависимости от количества птиц в пространстве взлета-посадки (пример)**

Количество птиц	Ил-76	Ан-26	Су-27	Л-39
0	0	0	0	0
1	0,030	0,010	0,005	0,002
2	0,116	0,039	0,019	0,007
3	0,246	0,085	0,042	0,016
...	...	...	...	...
37	1	1,000	0,999	0,922
38	1	1,000	0,999	0,932
39	1	1,000	1,000	0,941
40	1	1,000	1,000	0,950

### **Модель прогнозирования возникновения неблагоприятных метеорологических условий**

Предметная область для прогнозирования возникновения неблагоприятных метеорологических условий представлена в виде значений среднесуточных температур и относительной влажности воздуха по Липецкой области за 2005 – 2020 гг., также получены данные о наступлениях точки росы за период 2017 – 2020 гг. Фрагмент данных приведен на рис. 2, из которого видно, что среднесуточная температура воздуха имеет высокую колеблемость, причем носит циклический характер с периодичностью пять месяцев.

Для случайно распределенной во времени колеблемости вычислим коэффициенты автокорреляции отклонений от тренда первого порядка, для чего используем метод поворотных точек Кэндела

$$r_u^{a1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} u_i u_{i+1}}{\frac{u_1^2}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} u_i^2 + \frac{u_n^2}{2}}, \quad (16)$$

где  $u_i$  – отклонения от тренда.

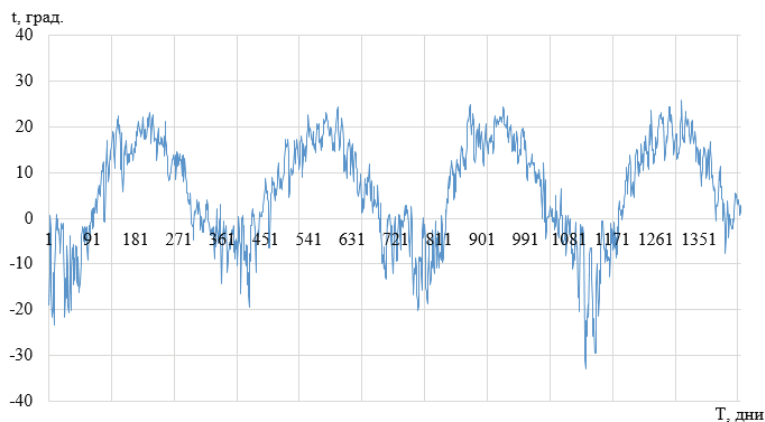
Колебания характеризуются показателями силы и интенсивности, которые аналогичны по построению, форме, показателям силы и интенсивности вариации признака в пространственной совокупности. Амплитуда (размах) колебаний – разность между наибольшим и наименьшим по абсолютной величине отклонениями от тренда. Среднее по модулю абсолютное отклонение от тренда равно

$$a(t) = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n - p}, \quad (17)$$

где  $y_i$  – фактический уровень;  $\hat{y}_i$  – выравненный уровень, тренд;  $n$  – число уровней;  $p$  – число параметров тренда.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) уровней ряда от тренда

$$s(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}. \quad (18)$$



**Рис. 2. Среднесуточная температура воздуха по Липецкой области**

Аналогично коэффициенту пространственной вариации отношение среднего квадратического отклонения от тренда к среднему уровню временного ряда называют коэффициентом колеблемости, который вычисляется по формуле

$$v(t) = \frac{s(t)}{\bar{y}}. \quad (19)$$

Необходимо подчеркнуть, что любая погрешность в определении типа тренда или при расчете его параметров приводит к преувеличению показателей силы и интенсивности колебаний.

*Представление синусоидальных колебаний анализируемых параметров в форме тригонометрического уравнения Фурье*

Исходным рядом для преобразования Фурье примем не первичный ряд за несколько лет, а усредненный ряд месячных уровней, в котором исключен тренд и(или) в основном погашены случайные колебания. Тригонометрическое уравнение ряда Фурье для его первой гармоники имеет вид

$$\hat{y} = a + b_1 \cos t_i + b_2 \sin t_i, \quad (20)$$

где  $a = \bar{y}$ ;  $t_i$  – угол, получаемый для каждого месяца нарастающим итогом ( $t_i = 0^\circ$  в январе, а месяц составляет  $30^\circ$  дуги).

Параметры  $b_1$  и  $b_2$  вычисляются по формулам:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{12} y_i \cos t_i}{6}, \quad b_2 = \frac{\sum_{i=1}^{12} y_i \sin t_i}{6}. \quad (21)$$

Если отклонения фактических уровней от расчетных по ряду Фурье малы, то далее может строиться прогноз и другие расчеты. Если же отклонения оказались значительными, следует на основании ряда отклонений повторить расчет, то есть рассчитать вторую гармонику, и тогда окончательные уровни модели (ряда Фурье) будут представлять собой сумму всех гармоник

$$\hat{y} = a + \sum_{k=1}^m b_{1k} \cos t_i + \sum_{k=1}^m b_{2k} \sin t_i, \quad (22)$$

где  $m$  – число гармоник;  $k$  – номер гармоники.

Наличие случайных колебаний уровней в отдельные моменты времени вносит неизбежный элемент случайности во все показатели динамики, вычисленные для данного временного ряда.

Для того чтобы проверить надежность тренда, следует проверить надежность для его основного параметра: среднегодового абсолютного изменения при линейном тренде, ускорения при параболе II порядка, коэффициента роста при экспоненте. Средняя ошибка репрезентативности выборочного коэффициента определяется по формуле

$$m_b = \frac{s(t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2}}, \quad (23)$$

где  $\sum_{i=1}^n t_i^2$  – рассчитывается при отсчете  $t_i$  от середины ряда или  $\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2$  – при отсчете  $t_i$  от начала ряда;  $n$  – число уровней ряда.

Величина критерия сравнивается с табличной величиной критерия Стьюдента при заданной вероятности и числе степеней свободы. Если исходный ряд достаточно велик, и применялось многократное скользящее определение среднего изменения уровней, формула средней ошибки параметра тренда видоизменяется

$$m_b = \frac{s(t)}{\sqrt{l \sum_{i=1}^n t_i^2}}, \quad (24)$$

где  $l$  – число баз расчета среднего параметра.

Для основного параметра параболы II порядка средняя ошибка репрезентативности выборочной оценки параметра вычисляется по формуле

$$m_c = \frac{s(t)}{\sqrt{\bar{t}_l^4 - (\bar{t}_l^2)^2}}, \quad (25)$$

где  $\bar{t}_l^4 - (\bar{t}_l^2)^2$  – рассчитывается при отсчете  $t_i$  от середины ряда или  $(\bar{t}_l - t)^2 - [(\bar{t}_l - t)^2]^2$  – при отсчете  $t_i$  от начала ряда.

Формула средней ошибки логарифма коэффициента изменения  $k$  имеет следующий вид:

$$m_{\ln k} = \frac{s(t) \ln k}{\sum_{i=1}^n t_i^2}. \quad (26)$$

Для кривых, не имеющих постоянного основного параметра, вышеизложенный метод проверки надежности неприменим. Если различие средних уровней в более поздний период надежно (нулевая гипотеза отвергается), значит тренд существует, а форма его уравнения определяется по соответствующим методикам и показателям [8, 9]. Прогноз, построенный по тренду, также нуждается в оценке. Оценка надежности прогноза осуществляется несколькими способами:

– для того чтобы оценить общее качество прогнозной модели, вычисляют среднюю ошибку аппроксимации по формуле

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(y_i - y_{\text{инп}})}{y_i} \right| 100, \quad (27)$$

где  $y_{\text{инп}}$  – прогнозные значения уровней ряда;

– вычисляют среднюю ошибку аппроксимации с учетом тренда

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(y_i - \hat{y}_i) - (y_{\text{инп}} - \hat{y}_i)}{(y_i - \hat{y}_i)} \right| 100. \quad (28)$$

Рассмотрим прогнозирование доверительных границ для линейного тренда. Оба его параметра – свободный член  $a$  и среднее изменение за единицу времени  $b$  – имеют ошибки репрезентативности выборочных оценок. Свободный член уравнения – это выборочная средняя величина уровней временного ряда, средняя ошибка репрезентативности которой вычисляется по формуле

$$m_a = \frac{s(t)}{\sqrt{n}}. \quad (29)$$

Средняя ошибка репрезентативности параметра  $b$  вычисляется по формуле (24). Объединяя эти ошибки как независимые по правилу для дисперсий независимых переменных, получаем формулу средней ошибки прогноза для линии тренда на период  $t_k$  с удалением от середины базы прогноза:

– при *однократном* выравнивании ряда за  $n$  периодов

$$m_{\hat{y}_i} = s(t) \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{t_k^2}{\sum_{i=1}^n t_i^2}}; \quad (30)$$

где  $\sum_{i=1}^n t_i^2$  – сумма квадратов номеров лет  $t_i$  от  $-\frac{n-1}{2}$  до  $+\frac{n-1}{2}$ ;

– при *многократном* скользящем выравнивании

$$m_{\hat{y}_i} = s(t) \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{t_k^2}{\sum_{i=1}^n t_i^2}}, \quad (31)$$

где  $n$  – длина каждой базы расчета;  $N$  – общая длина временного ряда.

Для получения достаточно надежных границ прогноза положения тренда с заданной вероятностью следует среднюю ошибку умножить на величину  $t$ -критерия Стьюдента при указанной вероятности (значимости) и при числе степеней свободы, равном для линейного тренда  $n - 2$ . Получаем предельную с данной вероятностью ошибку

$$\alpha = m_{\hat{y}_i} t, \quad (32)$$

где  $t$  –  $t$ -критерий Стьюдента с заданной вероятностью и числом степеней свободы.

Рассмотрим прогнозирование доверительного интервала для уровня отдельного периода (момента). Определив величину показателя колеблемости для прогнозируемого периода, подставляем его вместе с ошибкой прогноза конкретного отдельного уровня в единую формулу средней ошибки прогноза конкретного отдельного уровня

$$m_{Y_k} = \sqrt{m_{y_k}^2 + (s(t)_k)^2}. \quad (33)$$

Эта формула является общей для любых типов линии тренда. Для каждого типа различны первые слагаемые – ошибки тренда на период  $t_k$ . Для линейного тренда при однократном его расчете средняя ошибка прогноза для уровня отдельного момента  $t_k$  имеет вид

$$m_{y_k} = \sqrt{\frac{(s(t))^2}{n} + \frac{(s(t))^2 t_i^2}{\sum t_i^2} + (s(t)_k)^2}. \quad (34)$$

Данная формула должна применяться, если приведен расчет величины  $s(t)_k$  на прогнозируемый период, так как в этом случае в первых двух дробях в числитель входит величина  $s(t)$  за период-базу, а третье слагаемое подкоренного выражения – это прогнозируемая величина колеблемости на прогнозный период.

Если же на период прогноза принята та же величина показателя колеблемости, как и за период-базу расчета тренда, то она выносится из-под корня

$$m_{y_i} = s(t) \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{t_k^2}{\sum_{i=1}^n t_i^2}}. \quad (35)$$

Соответственно при многократном скользящем выравнивании средняя ошибка прогноза уровня отдельного момента  $t_k$

$$m_{y_i} = s(t) \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{t_k^2}{l \sum_{i=1}^n t_i^2}}. \quad (36)$$

Аналогично построению доверительных границ для тренда, для получения границ прогноза уровня отдельного момента с заданной вероятностью следует среднюю ошибку умножить на величину  $t$ -критерия Стьюдента.

Сравнивая интервальный прогноз уровней среднемесячных температур с использованием уравнения Фурье с реальными значениями данных показателей с января по декабрь 2022 г., получаем, что 80 % реальных данных находятся в доверительных границах прогноза.

Тренд месячных уровней относительной влажности воздуха по Липецкой области за 2017 – 2020 гг. имеет вид:  $\hat{y}_i = 76,6458 - 0,0111t_i$ ,  $t = 0,5$  в январе 2020 г.

Мера случайной колеблемости  $s(t_{\text{случ}}) = 3,51$  %.

Модель, учитывающая тренд и сезонность, имеет вид

$$\hat{y}_{ij} = (a + bt_i) \bar{l}_{\text{сез}}. \quad (37)$$

Рассчитаем прогноз среднемесячной относительной влажности воздуха на 2022 г. Для января 2022 г. получаем  $i = 24,5$ ,  $j = 1$ ,

$$\hat{y}_{ij} = (a + bt_i) \bar{l}_{\text{сез}} = (76,6458 - 0,0111 \times 24,5) \times (1,1154) = 85 \text{ \%}.$$

Средняя ошибка прогноза месячного уровня, вызванная наличием случайной колеблемости, для января 2022 г.

$$m_y = 3,51 \sqrt{1 + \frac{1}{48} + \frac{600,25}{9212}} = 3,6578 \text{ \%}.$$

Доверительные границы прогноза среднемесячных температур в январе 2007 г. составят с вероятностью 0,05 ( $t$ -критерий Стьюдента  $t = 2,086$ )

$$85 \pm 2,086 \times 3,6578 \text{ или от } 77 \text{ до } 93 \text{ \%}.$$

Сравнивая интервальный прогноз уровней среднемесячной относительной влажности воздуха с использованием средних индексов сезонности с реальными значениями данных показателей с января по май 2022 г., получаем, что 80 % реальных данных находятся в доверительных границах прогноза.

Зная прогноз среднемесячной влажности и температуры по Липецкой области на 2022 г., можно с вероятностью 0,95 предсказать наступление точки росы в определенные месяцы данного года. Отообразим случаи наступления точки росы на графике, который показывает, что наибольшая вероятность наступления точки

росы в 2002 г. в ноябре, декабре, марте, феврале (рис. 3). Верификация модели проводится с использованием статистических данных о наступлении туманов, приведенных в качестве ежедневной справки за период 2015 – 2019 гг. (табл. 2).

Сравнивая расчетные данные о наступлении точки росы с полученными вероятностями, видим, что прогноз наступления точки росы достоверен для ноября – марта (см. рис. 3).

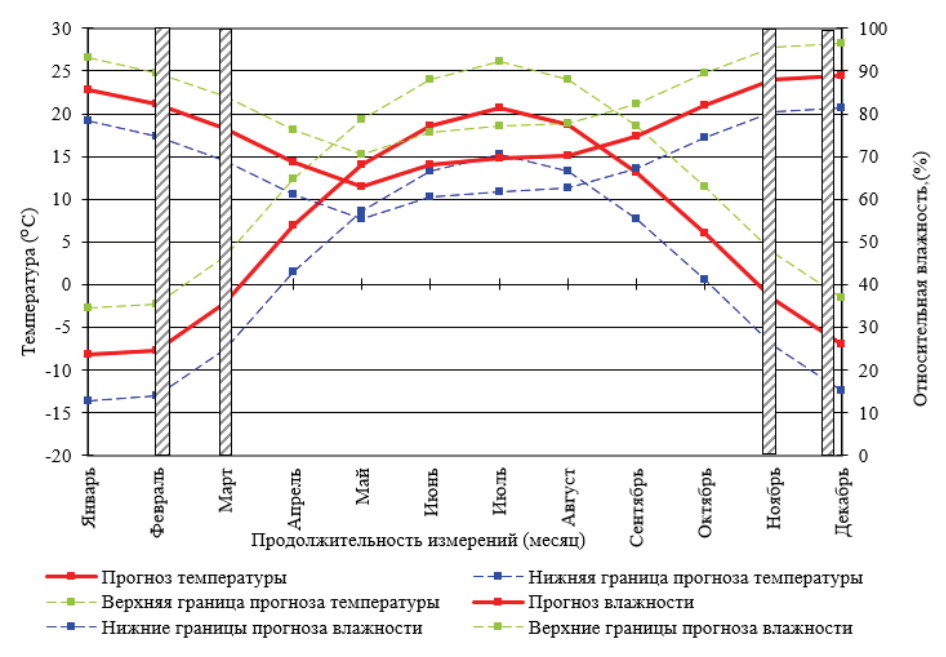


Рис. 3. Прогноз наступления точки росы в 2022 г.

Таблица 2

Вероятность наступления точки росы для каждого месяца года

Месяц	Вероятность, %
Январь	95,2
<b>Февраль</b>	<b>93,4</b>
<b>Март</b>	<b>90,27</b>
Апрель	23,48
Май	12,78
Июнь	6,09
Июль	3,65
Август	5,98
Сентябрь	10,25
Октябрь	16,87
<b>Ноябрь</b>	<b>90,32</b>
<b>Декабрь</b>	<b>94,12</b>



Таким образом, сопоставление результатов моделирования с фактическими данными подтверждает, что разработанные математические модели адекватно отражают динамику исследуемых показателей и могут быть использованы для долгосрочного прогнозирования условий безопасного выполнения полетов с учетом вероятности возникновения неблагоприятных условий внешней среды.

### Заключение

Предложенные математические модели прогнозирования среднемесячных температур с использованием уравнения Фурье демонстрируют высокую точность прогноза – 80 % реальных данных находятся в доверительных границах прогнозируемых значений. Аналогичный уровень точности достигнут при прогнозировании среднемесячной относительной влажности воздуха с использованием модели, учитывающей тренд и сезонность.

Разработанная модель прогнозирования рисков столкновения с птицами, основанная на пространственном процессе Пуассона, позволяет количественно оценить вероятность столкновения воздушных судов с птицами в трехмерном пространстве с учетом высотного распределения птиц. Модель учитывает как геометрические параметры воздушного судна, так и особенности распределения орнитофауны в районе аэродрома, что повышает точность прогнозирования риска столкновений.

Комплексное применение разработанных моделей для прогнозирования наступления точки росы позволило с вероятностью 0,95 определить периоды наибольшего риска возникновения неблагоприятных метеорологических условий. Верификация модели на основе статистических данных о наступлении туманов за период 2015 – 2019 гг. подтвердила достоверность прогноза для ноября, декабря, февраля и марта.

### Список литературы

1. Мамаев, В. Я. Воздушная навигация и элементы самолетовождения : учебное пособие / В. Я. Мамаев, А. Н. Синяков, К. К. Петров. – Санкт-Петербург : Университет ГА, 2019. – 256 с.
2. Елисеева, И. И. Общая теория статистики : учебник / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – Москва : Финансы и статистика, 2017. – 368 с.
3. Dolbeer, R. A. Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States 1990 – 2019 / R. A. Dolbeer, M. J. Begier // Federal Aviation Administration National Wildlife Strike Database. – 2020. – No. 26. – 124 p.
4. Yuan, M. Model selection and estimation in regression with grouped variables / M. Yuan, Y. Lin // Journal of the Royal Statistical Society, Series B. – 2016. – Vol. 68. – P. 49 – 67.
5. Sparsity and smoothness via the fused lasso / R. Tibshirani, M. Saunders, S. Rosset [et al.] // Journal of the Royal Statistical Society, Series B. – 2017. – Vol. 67. – P. 91 – 108.
6. Moller, J. Statistical inference and simulation for spatial point processes / J. Moller, R. P. Waagepetersen. – Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2003. – 320 p.
7. Kingman, J. F. C. Poisson Processes / J. F. C. Kingman. – Oxford : Oxford University Press, 1993. – 104 p.
8. Salas E., Maurino D. E. (Eds.) Human Factors in Aviation. – 3rd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – 908 p.
9. Jordan, R. A statistical learning approach to the modeling of aircraft taxi time / R. Jordan, M. A. Ishutkina and T. G. Reynolds // 29th Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, UT, USA. – 2010. – P. 1.B.1-1–1.B.1-10. doi: 10.1109/DASC.2010.5655532

# Mathematical Models and Algorithms for Numerical Forecasting of Emergence of Adverse Ornithological and Meteorological Conditions Performance of State Aviation

D. V. Kakhanovsky✉

*Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots  
named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov, yava73@bk.ru; Krasnodar, Russia*

**Keywords:** model verification; relative air humidity; spatial Poisson process; bird strike risk; Fourier series; dew point; environmental conditions.

**Abstract:** The article presents the results of a study of mathematical models and algorithms for numerical forecasting of the occurrence of adverse environmental conditions. An algorithmic approach to identifying the parameters of a regression combined risk function and grouping independent variables is proposed. Special attention is paid to the development of a model for forecasting the risk of aircraft collision with birds based on the application of a spatial Poisson process. Three model versions with varying levels of detail of the initial data are presented. Forecasting of meteorological conditions influencing the occurrence of adverse environmental conditions is carried out, with the results being verified.

## References

1. Mamayev V.Ya., Sinyakov A.N., Petrov K.K. *Vozdushnaya navigatsiya i elementy samoletovozhdeniya: uchebnoye posobiye* [Navigation and Elements of Aircraft Piloting: A Textbook], St. Petersburg: Universitet GA, 2019, 256 p. (In Russ.)
2. Yeliseyeva I.I., Yuzbashev M.M. *Obshchaya teoriya statistiki: uchebnik* [General Theory of Statistics: A Textbook], Moscow: Finansy i statistika, 2017, 368 p. (In Russ.)
3. Dolbeer R.A., Begier M.J. *Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States 1990-2019*, Federal Aviation Administration National Wildlife Strike Database, Serial Report Number 26, 2020.124 p.
4. Yuan M., Lin Y. Model selection and estimation in regression with grouped variables, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 2016, vol. 68, pp. 49-67.
5. Tibshirani R., Saunders M., Rosset S. [et al.], Sparsity and smoothness via the fused lasso, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B.*, 2017, vol. 67, pp. 91-108.
6. Moller J., Waagepetersen R.P. *Statistical inference and simulation for spatial point processes*, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003, 320 p.
7. Kingman J.F.C. *Poisson processes*. Oxford: Oxford University Press, 1993. 104 p.
8. Salas E., Maurino D.E. (Eds.), *Human Factors in Aviation*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2020, 908 p.
9. Jordan R., Ishutkina M.A., Reynolds T.G., A statistical learning approach to the modeling of aircraft taxi time, *29th Digital Avionics Systems Conference*, Salt Lake City, UT, USA, 2010, pp. 1.B.1-1-1.B.1-10, doi: 10.1109/DASC.2010.5655532

## **Mathematische Modelle und Algorithmen zur numerischen Vorhersage ungünstiger astronomischer und meteorologischer Bedingungen während Luftfahrten**

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der Untersuchung mathematischer Merkmale und numerischer Algorithmen zur Vorhersage des Auftretens ungünstiger Umgebungsbedingungen vorgestellt. Es ist ein algorithmischer Ansatz zur Identifizierung der Parameter der Regressions-kombinierten Risikofunktion und der Gruppierung unabhängiger Variablen vorgeschlagen. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung eines Modells zur Vorhersage von Kollisionsrisiken von Flugzeugen mit Vögeln, das auf der Anwendung des räumlichen Poisson-Prozesses basiert. Es gibt drei Modellvarianten mit unterschiedlichen Detailgraden der Quelldaten. Die meteorologischen Bedingungen, die das Auftreten ungünstiger Umgebungsbedingungen beeinflussen, sind mit der Überprüfung der Ergebnisse prognostiziert.

---

## **Modèles et algorithmes mathématiques de prévision numérique des conditions ornithologiques et météorologiques défavorables des vols aériens**

**Résumé:** Sont présentés les résultats de l'étude des modèles mathématiques et des algorithmes de la prévision numérique des conditions environnementales défavorables. Est proposée une approche algorithmique pour identifier les paramètres de la fonction de risque combinée de régression et les groupes des variables indépendantes. L'accent est mis sur l'élaboration d'un modèle de prévision des risques de collision d'aéronefs avec des oiseaux, basé sur l'application du processus spatial de Poisson. Sont présentés trois modèles avec des degrés variables de détail des données de base. Les conditions météorologiques qui influent sur l'apparition de conditions environnementales défavorables sont prévisionnées avec la vérification des résultats.

---

**Автор:** *Кахановский Денис Владимирович* – заместитель начальника училища по летной подготовке, ФГКВОУ ВО «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова», Краснодар, Россия.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СО СТАТИЧЕСКИМ СИНХРОННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ STATCOM

М. Албахри, Н. Г. Чернышов, К. А. Полкунов✉

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
polkunovk@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** асинхронный генератор; ветровая электростанция; электроэнергия; STATCOM.

**Аннотация:** Исследованы режимы работы компенсатора реактивной мощности STATCOM в электрических сетях с ветроэлектрическими установками. Проведено моделирование функционирования асинхронного генератора с переменной частотой посредством использования преобразователя AC/DC/AC. Доказана способность STATCOM обеспечивать динамическую стабилизацию напряжения в диапазоне 0,95...1,05 о.е. при резких изменениях скорости ветра и аварийных ситуациях, включая восстановление номинального уровня напряжения за 0,2...0,5 с после коротких замыканий. Проанализировано повышение электродинамической устойчивости энергосистемы и увеличение пропускной способности линий электропередачи на 12 – 15 % за счет оперативной компенсации реактивной мощности.

---

### Введение

Большие запасы нефти, газа и угля и их доступность определили российскую модель развития энергетики. Так, удельная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в России без учета гидроэлектростанций (ГЭС) практически полностью состоит из ветровых электростанций (ВЭС) и фотоэлектрических (ФЭС) установок и составила в 2021 г. 1,12 %. Однако изменения в структуре энергетического комплекса в последние годы стали более заметными: в 2020 г. впервые за 5 лет произошло снижение суммарной установленной мощности тепловых электростанций на 1320 МВт, что примерно эквивалентно увеличению установленной мощности ВИЭ на 1207 МВт. Следует отметить, что энергетический комплекс России в целом низкоуглеродный, при этом более половины удельной мощности энергосистем приходится на гидроэнергетику и атомные электростанции [1]. На глобальном уровне повышение электрической нагрузки привело к значительному увеличению мощностей по выработке электроэнергии. Кроме того, поскольку электростанции обычно располагаются далеко от центров электрических нагрузок, возможны значительные потери электроэнергии и трудности с обеспечением необходимого уровня напряжения. В связи с этим возникает необходимость установки объектов распределенной генерации (РГ) – небольших объектов, работающих при единичном коэффициенте мощности, таких как фотоэлектрические батареи, топливные элементы и аккумуляторы. Располагаясь вблизи центров нагрузки, они могут также способствовать решению этих проблем. Однако наиболее эффективным является включение в состав энергетиче-

ского комплекса встроенных установок [2], поэтому актуально повышение эффективности функционирования ветроэнергетической установки (ВЭУ) при включении в состав комплекса установки статического компенсатора реактивной мощности STATCOM [3].

*Цель работы* – исследование режимов работы компенсатора реактивной мощности STATCOM в электрических сетях с ветроэлектрическими установками.

## **Имитационная модель генератора IG со STATCOM**

### ***Методы моделирования IG (асинхронный генератор)***

Предыдущие исследования столкнулись с некоторыми проблемами при моделировании интеграции системы STATCOM с асинхронными двигателями ветряной электростанции, такими как интеграция устройств защиты при нештатных рабочих ситуациях и тройных отказах или выходе из строя одной из турбин или группы турбин при увеличении скорости ветра в регионе [4]. Для решения этих задач предлагается использовать метод математического моделирования с использованием уравнений или моделирующих схем для управления электрическими конструкциями в компьютерных программах, таких как MATLAB, NEPLAN, ETAB и др. [5] В зависимости от частотного диапазона в специализированных энергосистемах в настоящее время доступны три метода моделирования для изучения систем преобразования мощности на основе преобразователей напряжения, построенных на базе IGBT-транзисторов. Для достижения приемлемой точности с частотами переключения 1620 и 2700 Гц, используемыми в данной модели, они должны быть дискретизированы с относительно небольшим временным шагом в 5 мкс. Такая модель хорошо подходит для наблюдения за гармониками и динамическими характеристиками системы управления в течение относительно коротких периодов времени (от сотен миллисекунд до одной секунды).

В основу исследования положена дискретная усредненная модель ветрогенератора с двойным питанием ротора (DFIG), реализованная в примере power\_wind\_dfig\_avg (дискретная усредненная модель) библиотеки MATLAB [6]. В данной модели силовые преобразователи с источником напряжения аппроксимируются эквивалентными источниками напряжения, формирующими усредненное значение переменного напряжения за период коммутации. Такой подход обеспечивает учет динамических свойств системы при возможности использования увеличенного шага интегрирования (порядка 50 мкс). Это позволяет проводить моделирование процессов длительностью до нескольких секунд, что определяет выбор данной модели для настоящего исследования.

Для анализа низкочастотных электромеханических колебаний в продолжительных временных интервалах (от десятков секунд до минут) использована непрерывная векторная модель ветрогенератора с двойным питанием ротора, представленная в примере power\_wind\_dfig (непрерывная векторная модель) библиотеки MATLAB [7], где синусоидальные напряжения и токи заменяются комплексными векторными величинами, фиксированными на номинальной частоте сети 50 Гц. Такой метод, широко применяемый в программных комплексах для анализа устойчивости энергосистем, обеспечивает эффективное моделирование медленных динамических процессов.

### ***Разработка математической модели ветроэнергетической установки с интегрированным STATCOM в среде MATLAB/Simulink***

При разработке математической модели ВЭУ применен асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (IG – *Induction Generator*). Электромагнитные процессы в генераторе описаны уравнениями Парка–Горева в среде MATLAB/Simulink. Параметры генератора представлены на рис. 1 и в табл. 1.

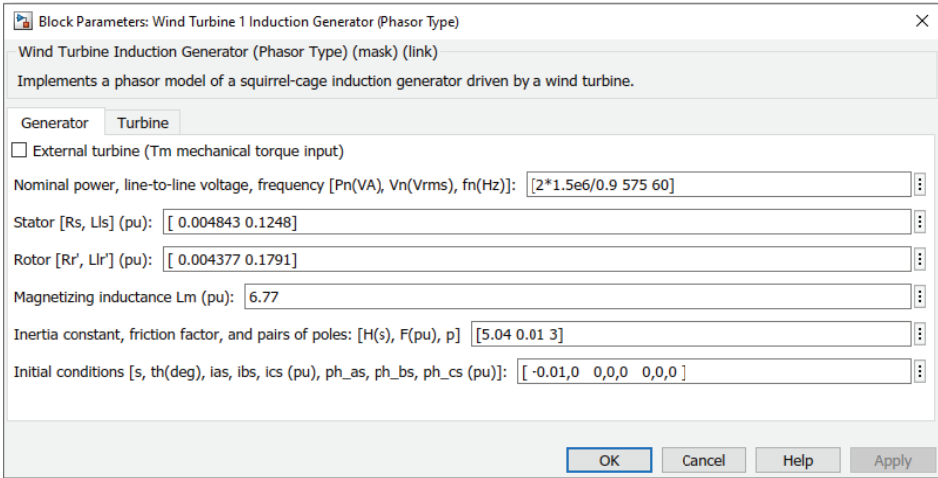


Рис. 1. Параметры генератора в MATLAB

Таблица 1

Параметры моделируемого асинхронного генератора, о. е.

Статор	Ротор	Индуктивность цепи намагничивания
$R_s = 0,004843$	$R_r = 0,004377$	$L_m = 6,77$
$L_s = 0,1248$	$L_r = 0,1791$	Коэффициент трения 0,01

Для запуска моделирования m.file в рабочей области MATLAB запускает инициализацию параметров машины. Необходимо принять меры для защиты преобразователя напряжения от аварийных режимов. Кроме того, добавление блока управления активной и реактивной мощностью дает системе больше возможностей для точного управления уровнями напряжения, особенно при возникновении электрических неисправностей всех видов посредством коммутации батареи конденсаторов.

Описание ветровой электростанции

Ветровая электростанция мощностью 9 МВт, состоящая из шести ветровых турбин мощностью 1,5 МВт, подключенных к распределительной системе 25 кВ, генерирует напряжение через фидер 25 кВ протяженностью 30 км.

Ветроэнергетические установки с асинхронным генератором двойного питания (DFIG) включают асинхронную машину с фазным ротором и двунаправленный преобразователь AC/DC/AC на IGBT-транзисторах с ШИМ-управлением. Обмотка статора подключена напрямую к сети 50 Гц, в то время как обмотка ротора присоединена через преобразователь с регулируемой частотой. Технология DFIG позволяет получать максимум энергии при низких скоростях ветра за счет регулирования скорости вращения турбины и снижения механических нагрузок при порывах ветра (рис. 2).





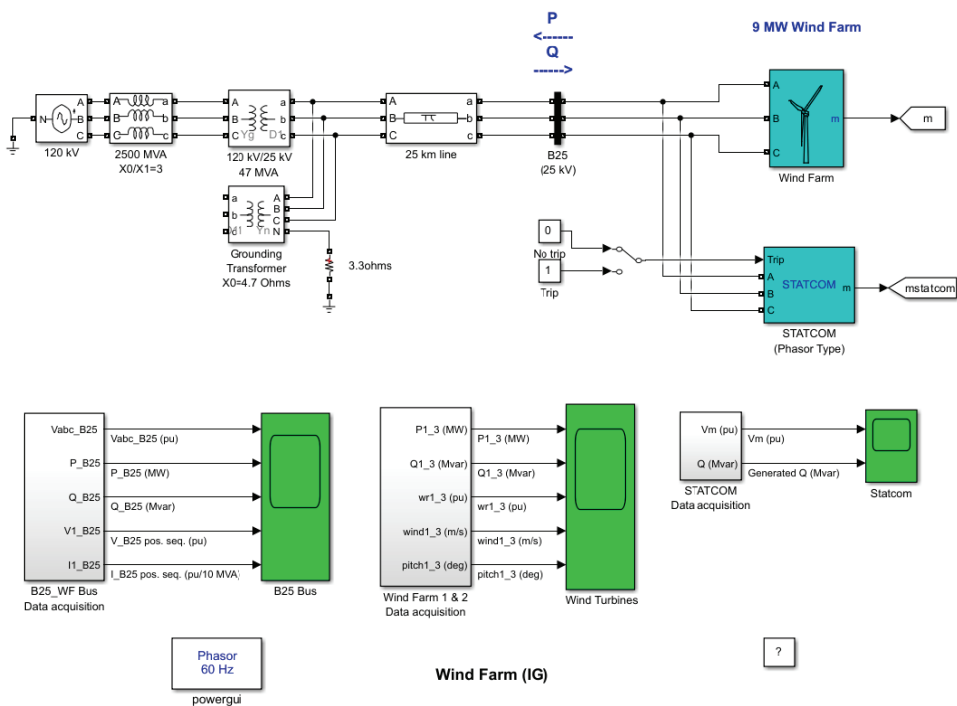


Рис. 3. Модель асинхронного генератора в MATLAB

### Влияние STATCOM на стабилизацию напряжения в сети ВЭУ – результаты моделирования

Проанализируем влияние реактивной мощности STATCOM на стабилизацию сетевого напряжения ветроэнергетической установки. Выработка электроэнергии ветротурбинами существенно зависит от колебаний скорости ветра (рис. 4).

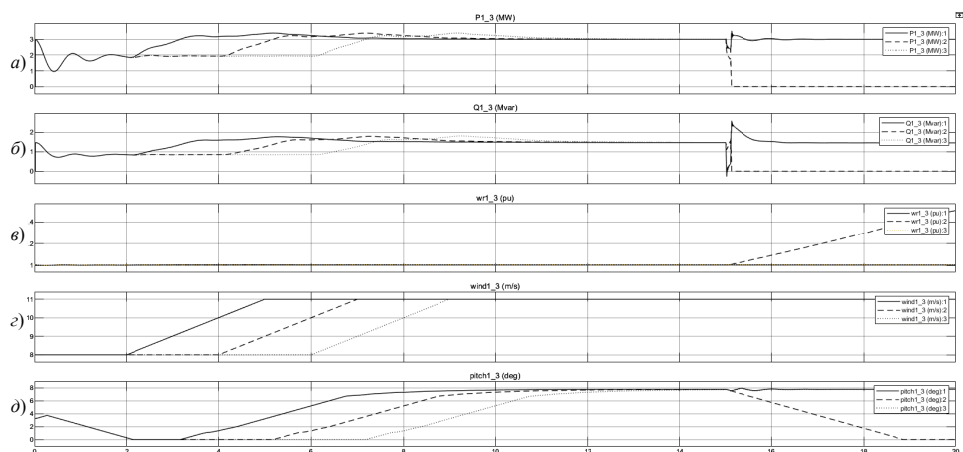
*Первый этап* – возмущающее воздействие в работу системы со STATCOM:

- вырабатываемая активная мощность начинает постепенно увеличиваться и достигает номинального значения 3 МВт примерно за 8 с, частота вращения турбины увеличилась с 1,0028 до 1,0047 о.е.;
- угол наклона также увеличился с 0° до 8°;
- реактивная мощность, потребляемая турбиной, возрастает с ростом активной выходной мощности и достигает 1,47 Мвар при номинальной нагрузке (1,5 МВт);
- когда скорость ветра достигает номинальной скорости 11 м/с, сумма фактической мощности, обеспечиваемой турбинами, вводимыми в коллекторные стержни, составляет 9 МВт;

Таким образом, система STATCOM поддерживает уровень напряжения от 0,98 до 0,99 о.е., обеспечивая реактивную мощность 1,62 Мвар. Динамика изменения параметров в процессе работы системы представлена на рис. 5.

*Второй этап* – работа системы при разделении блоков STATCOM.

Влияние STATCOM на систему отмечено при его отключении. Мгновенное снижение напряжения на коллекторной шине В до 0,91 о.е. вызывает критический рост тока нагрузки, что приводит к срабатыванию максимальной токовой защиты и отключению пары турбин через 15 с. При повторном вводе STATCOM в работу напряжение восстанавливается до 1,0 о.е. Стабильность системы в послеаварийном режиме обеспечивается генерацией реактивной мощности STATCOM 1,65 Мвар. Характеристики компенсации напряжения и реактивной мощности, предоставляемые STATCOM в различных режимах работы, показаны на рис. 6.

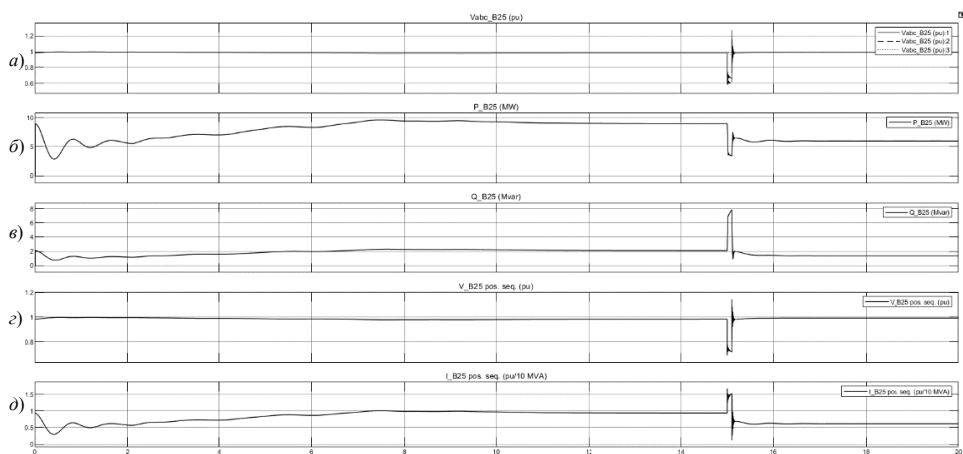


**Рис. 4. Кривые работы пары турбин:**

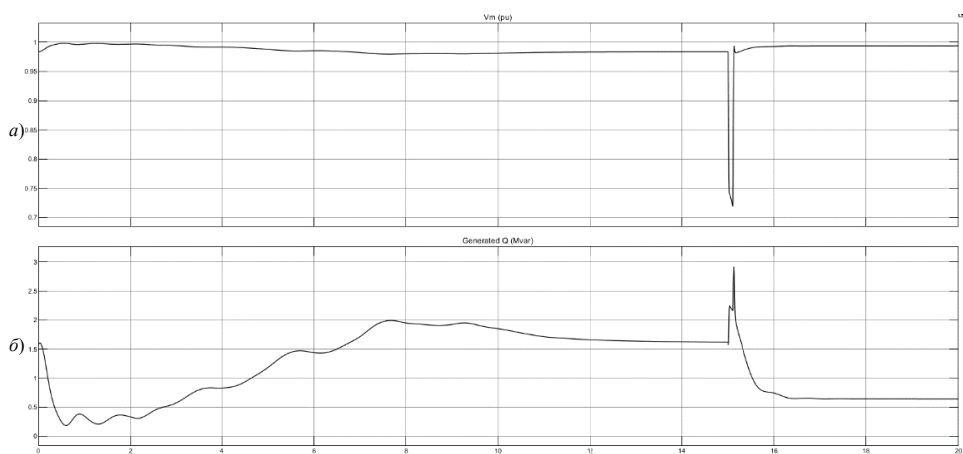
*a* – фактическая мощность; *б* – реактивная мощность; *в* – угловая скорость;

*г* – скорость ветра; *д* – угол наклона лопастей:

— – первой; ..... – второй; - - - - - – третьей



**Рис. 5. Кривые линейного напряжения (*a*), активной (*б*) и реактивной (*в*) мощности, напряжения (*г*) и тока (*д*) соединительной шины B25, показанной на рис. 3**



**Рис. 6. Компенсация за электрическое напряжение (*a*) и недействительную мощность (*б*), предоставленные STATCOM**

Исследования подтвердили, что асинхронные генераторы, особенно с двойным питанием ротора (DFIG), благодаря превосходству динамических характеристик над синхронными машинами, являются преобладающей технологией в современных ВЭУ. Компенсация реактивной мощности решает две ключевые задачи – коррекцию коэффициента мощности нагрузки и стабилизацию напряжения на распределительных шинах.

Первая задача решается повышением коэффициента мощности, особенно актуальным для крупных потребителей. Вторая – обеспечивается балансировкой реактивной мощности посредством специализированных устройств: статических компенсаторов (SVC) и статических синхронных компенсаторов (STATCOM). Последние, как представители семейства FACTS, применяются в системах передачи электроэнергии для повышения устойчивости.

### Заключение

Обеспечение устойчивости энергосистем – ключевая задача при интеграции возобновляемых источников энергии наряду с традиционной генерацией. STATCOM обеспечивает превосходное регулирование напряжения по сравнению со статическими компенсаторами в условиях системных возмущений [8]. Согласно результатам моделирования, STATCOM поддерживает напряжение вблизи номинального уровня (1,0 о.е.) при интеграции мощности ветрогенераторов, а также оперативно компенсирует дисбалансы, восстанавливая номинальное напряжение за минимальное время. Благодаря таким динамическим характеристикам, как быстродействие и точность стабилизации, STATCOM демонстрирует более высокую эффективность компенсации реактивной мощности, чем тиристорные статические компенсаторы.

Повышение электродинамической устойчивости энергосистем, интегрирующих в себя ветровые электростанции, достигается применением устройств FACTS (англ. Flexible AC Transmission Systems), таких как статический синхронный компенсатор STATCOM. Динамическая модель системы реализована в MATLAB/Simulink. Для оценки влияния системы управления STATCOM на поведение энергосистемы исследованы аварийные и послеаварийные режимы, включая трехфазные короткие замыкания и скачкообразные изменения нагрузки. Результаты моделирования подтверждают эффективность STATCOM в следующих аспектах:

- повышение устойчивости (включая демпфирование мощностных колебаний);
- стабилизация напряжения в диапазоне 0,95...1,05 о.е. [9];
- рост пропускной способности линий электропередачи на 12 – 15 % [10];
- восстановление напряжения до номинала за 0,2...0,5 с после короткого замыкания благодаря генерации реактивной мощности [11].

### Список литературы

1. Устинов, Д. А. Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор / Д. А. Устинов, А. Р. Айсар // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 15–20. doi: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20
2. Абрамович, Б. Н. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий / Б. Н. Абрамович, И. А. Богданов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 408–416. doi: 10.31897/PMI.2021.3.10
3. Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба / Я. Э. Шклярский, Д. Д. Герра, Э. В. Яковлева, А. Рассылкин //

Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 427–440. doi: 10.31897/PMI.2021.3.12

4. Kovalchuk, M. S. Modelling and control system of multi motor conveyor / M. S. Kovalchuk, S. V. Baburin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327, No. 2. – P. 022065. doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022065

5. Distortion Load Identification Based on the Application of Compensating Devices / Ya. Shklyarskiy, A. Skamyin, I. Vladimirov, F. Gazizov // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 6. – P. 1430. doi: 10.3390/en13061430

6. Wind Farm – Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) Phasor Model : OPAL-RT TECHNOLOGIES, Inc. – URL : <https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PSPS/pages/1551735113/Wind+Farm+-+Doubly-Fed+Induction+Generator+DFIG+Phasor+Model> (дата обращения: 10.11.2025).

7. Application examples: Plexim GmbH. – URL : <https://www.plexim.com/support/application-examples> (дата обращения: 10.11.2025)

8. Tian, L. Studies on the fault ride-through capability improvement of wind farm by using STATCOM / L. Tian, T. Wang, W. Wang // Proc. of International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. – 2011, – No. 2. – P. 1032–1036. doi: 10.1109/APAP.2011.6180497

9. Сычев, Ю. А. Повышение качества электроэнергии в системах электро-снабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 132–140. doi: 10.31897/PMI.2021.1.14

10. Molinas, M. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC / M. Molinas, J. A. Suul, T. Undeland // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2008. – Vol. 23, No. 3. – P. 1104–1117. doi: 10.1109/TPEL.2008.921169

11. Control strategy for improving fault ride-through capability of cascaded inverter-based STATCOM / Y. Liu, K.A. Huang, G. Tang, S. Bhattacharya // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, No. 4. – P. 2537–2545. doi: 10.1109/TPWRD.2008.917896

---

## Research and Simulation of the IG Induction Generator with a Static Synchronous Compensator STATCOM

M. Albakhri, N. G. Chernyshov, K. A. Polkunov✉

*Department of Radioelectronic and Microprocessor Systems Design,  
nchtamb@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** asynchronous generator; wind power plant; electric power; STATCOM.

**Abstract:** The paper presents the finding of the research into the operating modes of the STATCOM reactive power compensator in electric grids with wind turbines. The operation of an asynchronous generator with a variable frequency was simulated using an AC/DC/AC converter. The study demonstrated the ability of STATCOM to provide dynamic voltage stabilization in the range of 0.95–1.05 p.u. during sudden

changes in wind speed and emergency situations, including restoration of the nominal voltage level within 0.2–0.5 s after short circuits. The improvement in the electrodynamic stability of the power system and the increase in transmission capacity of power lines by 12–15 % due to operational reactive power compensation were analyzed.

### References

1. Ustinov D.A., Aysar A.R. [Analysis of the Impact of the Distributed Generation Facilities on Protection Systems and Voltage Mode: Review], *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], 2023, no. 2, pp. 15-20. doi: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20 (In Russ., abstract in Eng.).
2. Abramovich B.N., Bogdanov I.A. [Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises], *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 249, pp. 408-416. doi: 10.31897/PMI.2021.3.10 (In Russ., abstract in Eng.).
3. Shklyarskiy Ya.E., Guerra D.D., Iakovleva E.V., Rassölkin A. [The influence of solar energy on the development of the mining industry in the Republic of Cuba], *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 249, pp. 427-440. doi: 10.31897/PMI.2021.3.12 (In Russ., abstract in Eng.).
4. Kovalchuk M.S., Baburin S.V. Modelling and control system of multi motor conveyor, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, no. 2, pp. 022065. doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022065
5. Shklyarskiy Ya., Skamyin A., Vladimirov I., Gazizov F. Distortion Load Identification Based on the Application of Compensating Devices, *Energies*, 2020, vol. 13, no. 6, pp. 1430. doi: 10.3390/en13061430
6. Wind Farm – Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) Phasor Model : OPAL-RT TECHNOLOGIES, Inc., available at: <https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PSPS/pages/1551735113/Wind+Farm+-+Doubly-Fed+Induction+Generator+DFIG+Phasor+Model> (accessed 10 November 2025).
7. Application examples : Plexim GmbH, available at: <https://www.plexim.com/support/application-examples> (accessed 10 November 2025)
8. Tian L., Wang T., Wang W. Studies on the fault ride-through capability improvement of wind farm by using STATCOM, *Proc. of International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011, no. 2, pp. 1032-1036. doi: 10.1109/APAP.2011.6180497
9. Sychev Yu.A., Zimin R.Yu. [Improving the quality of electricity in power supply systems of the mineral resource complex by hybrid filter-compensating devices], *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 247, pp. 132-140. doi: 10.31897/PMI.2021.1.14 (In Russ., abstract in Eng.).
10. Molinas M., Suul J.A., Undeland T. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 1104-1117. doi: 10.1109/TPEL.2008.921169
11. Liu Y., Huang K.A., Tang G., Bhattacharya S. Control strategy for improving fault ride-through capability of cascaded inverter-based STATCOM, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 2537-2545. doi: 10.1109/TPWRD.2008.917896

## **Forschung und Simulation eines asynchronen Generators mit einem statischen Synchronkompensator (STATCOM)**

**Zusammenfassung:** Die Betriebsarten eines STATCOM-Blindleistungskompensators in Stromnetzen mit Windkraftanlagen sind untersucht. Der Betrieb eines Asynchrongenerators mit variabler Frequenz ist mithilfe eines AC/DC/AC-Umrichters simuliert. Die Fähigkeit des STATCOM, eine dynamische Spannungsstabilisierung im Bereich von 0,95–1,05 p.u. bei plötzlichen Windgeschwindigkeitsänderungen und in Notfallsituationen zu gewährleisten, einschließlich der Wiederherstellung des Nennspannungsniveaus innerhalb von 0,2–0,5 s nach Kurzschlüssen, ist demonstriert. Die Verbesserung der elektrodynamischen Stabilität des Stromnetzes und die Erhöhung der Übertragungskapazität der Stromleitungen um 12–15 % durch die Blindleistungskompensation sind analysiert.

---

## **Recherche et modélisation du générateur asynchrone avec compensateur synchrone statique STATCOM**

**Résumé:** Sont étudiés les modes de fonctionnement du compensateur de puissance réactive STATCOM dans les réseaux électriques avec des installations éoliennes. Est réfléchi la simulation du fonctionnement d'un générateur asynchrone à fréquence variable à l'aide d'un convertisseur AC/DC/AC. Est prouvée la capacité de STATCOM à fournir une stabilisation dynamique de la tension dans la plage de 0,95–1,05 OE avec des changements brusques de la vitesse du vent d'urgence, y compris le rétablissement de la tension nominale entre 0,2 et 0,5 s après un court-circuit. Sont analysées l'augmentation de la stabilité électrodynamique du réseau électrique et l'augmentation de la capacité des lignes de transmission de 12 à 15 % grâce à la compensation opérationnelle de la puissance réactive.

---

**Авторы:** *Албахри Мохаммед* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Чернышов Николай Генрихович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Полкунов Константин Александрович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ

Г. А. Ануар✉

*Кафедра «Космическая техника и технология»,  
Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,  
galym\_rta@mail.ru; Астана, Республика Казахстан*

**Ключевые слова:** датчик; диапазон измерения; оптимальная конструкция; стабильность характеристик; чувствительный элемент.

**Аннотация:** Для определения оптимальной конструкции чувствительного элемента рассмотрены несколько методик, использующихся для разработки датчиков. Результаты анализа показывают необходимость учитывать различные факторы, такие как измеряемая величина, точность и диапазон измерений, стабильность, устойчивость к внешним воздействиям, стоимость и др. Методика измерения линейности чувствительного элемента позволяет оценить, как датчик реагирует на изменение измеряемой величины в пределах своего диапазона. Выбор упругих элементов осуществляется с учетом требуемых характеристик. Представлен комплексный подход решения технической задачи, учитывающий различные нагрузки и пространственное расположение датчика. Доказано, что повышение точности расчета конструкции позволяет обеспечить максимальную чувствительность датчика и предотвратить возникновение недопустимых напряжений. Отмечено, что оптимальная конструкция чувствительного элемента обеспечивает высокую точность измерений, позволяет снизить затраты на производство и эксплуатацию.

---

### Введение

Определение оптимальной конструкции чувствительного элемента является одной из важнейших задач в разработке датчиков. Это обеспечивает не только высокую точность измерений, но и позволяет снизить затраты на производство и эксплуатацию. Для того чтобы выбрать оптимальную конструкцию чувствительного элемента, необходимо рассмотреть несколько методик [1], которые могут быть использованы при разработке датчиков.

*Первая* методика заключается в испытании чувствительных элементов при различных температурах, причем температурный диапазон должен быть максимально близок к реальным условиям эксплуатации датчика. По таким условиям можно оценить степень защиты термостабильности.

*Вторая* – механические испытания, при которых датчик подвергается воздействию различных механических нагрузок, таких как вибрации и удары. Это помогает получить представление о стойкости датчика к реальным механическим воздействиям.

*Третья* – определение скорости реакции чувствительного элемента. Помогает оценить скорость реакции датчика на изменение измеряемой физической величины. Особенно это важно в таких сферах, как автоматизированные процессы производства, где к скорости реакции датчика предъявляются жесткие требования.



*Четвертая* – измерение линейности чувствительного элемента. Позволяет оценить, как датчик реагирует на изменение измеряемой величины в пределах своего диапазона.

Таким образом, каждая из методик помогает оценить способность датчика реагировать на изменения внешних условий и принимать правильные решения по выбору оптимальной конструкции датчика.

### Материалы и методы

При выборе оптимальной конструкции чувствительного элемента для датчика необходимо учитывать следующие факторы.

1. Вид измеряемой величины. В зависимости от того, что именно необходимо измерять (температуру, давление, уровень жидкости и т.д.), будет выбран соответствующий тип чувствительного элемента [2].

2. Точность и диапазон измерений. Необходимо выбрать чувствительный элемент, который может обеспечить требуемую точность измерений в заданном диапазоне значений.

3. Стабильность работы. Некоторые чувствительные элементы могут изменять свою характеристику со временем или при изменении условий эксплуатации. Важно выбирать такой элемент, который обладает необходимой стабильностью работы.

4. Устойчивость к внешним воздействиям. Датчики могут подвергаться воздействию внешних факторов, таких как вибрации, пыль, влага и т.д. [3, 4]. Чувствительный элемент должен быть достаточно устойчивым к таким воздействиям.

5. Стоимость производства. Следует учитывать стоимость производства датчика, в том числе и стоимость чувствительного элемента, чтобы датчик был доступен для широкого круга потребителей.

Таким образом, выбор оптимальной конструкции чувствительного элемента для датчика зависит от ряда факторов и требует тщательного анализа и обоснования.

Конструкции упругих элементов датчиков весьма разнообразны. В динамометрах на большие усилия (больше 10 кН) используются сплошные стержни, работающие на сжатие (рис. 1, *а*) или сдвиг (рис. 1, *б*); для меньших усилий (10...1 кН) используют кольца, а для малых усилий – тонкостенные цилиндры и плоские пружины в виде балок. При этом наиболее эффективными оказываются конструкции в виде тонкостенного цилиндра или балки равного сопротивления, когда по всей поверхности упругого элемента механическое напряжение одинаково и материал используется наиболее рационально.

На рисунке 2 показаны часто применяемые преобразователи крутящего момента  $M$  в угловое перемещение – спиральные пружины (рис. 2, *а*, *б*), сплошные, полые и плоские торсионы (рис. 2, *в*, *г*, *е*), подвесы и растяжки (рис. 2, *д*). Особенно разнообразны упругие элементы, применяемые для измерения давлений, –

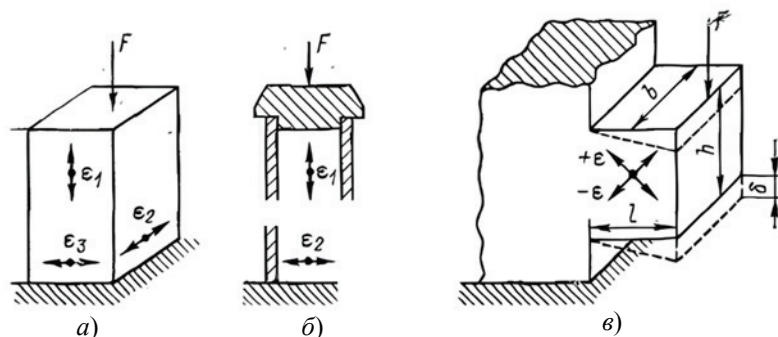


Рис. 1. Конструкции упругих элементов

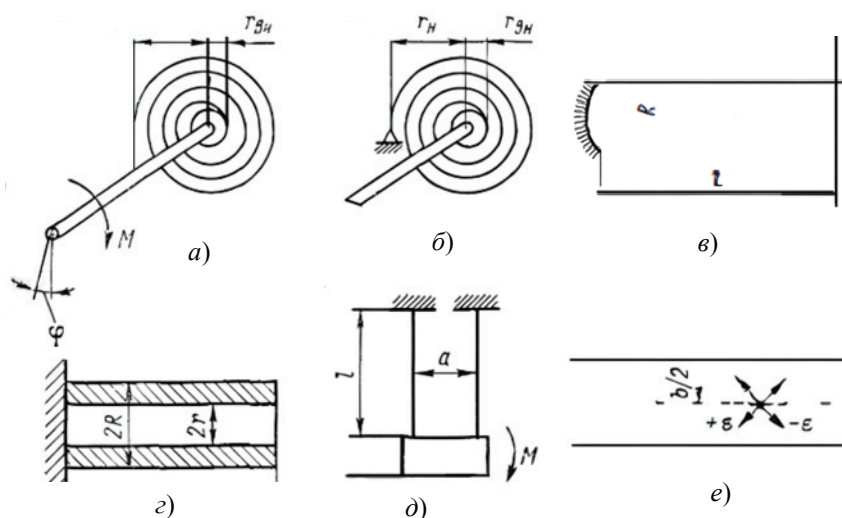


Рис. 2. Преобразователи крутящего момента

плоские и гофрированные мембраны и мембранные коробки, использующие собственную жесткость или опирающиеся на внешнюю плоскую пружину или полый тонкостенный цилиндр, на которые наклеены или напылены тензорезисторы.

Для получения больших линейных перемещений применяются сильфоны и трубки Бурдона, а для больших угловых – спиральные и винтовые трубки с внутренним давлением. Расчет таких упругих элементов приводится в специальных справочниках.

При расчете упругих элементов стремятся обеспечить их максимальную чувствительность. Однако препятствием к этому является возникновение в опасных точках конструкции недопустимо больших напряжений. Поэтому исходным для расчета упругих элементов является описание их с помощью уравнений, которые связывают значения сил, механических деформаций и возникающих напряжений [5].

Свойства изотропных материалов описываются двумя независимыми параметрами: модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ . При расчете элементов, испытывающих чистый сдвиг или скручивание, используют модуль сдвига  $G$ , который равен  $G = 0,5E/(1 + \mu)$ .

Из трех постоянных  $E$ ,  $G$  и  $\mu$  независимыми являются лишь две, а третья всегда может быть выражена через две другие.

Формулы для расчета упругих элементов различной формы приведены ниже, где используются следующие обозначения:  $F$  – сила;  $F_0$  – начальное натяжение;  $M$  – крутящий момент;  $P$  – давление;  $\delta$  – прогиб, абсолютное удлинение;  $\varepsilon$  – относительное удлинение;  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\eta$  – удлинение соответственно в направлении радиуса и перпендикулярно ему;  $\sigma_{1,2}$  – механическое напряжение в точках 1, 2;  $\sigma_0$  – начальное напряжение;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\eta$  – напряжение соответственно в направлении радиуса и перпендикулярно ему;  $\tau$  – касательное напряжение;  $l$  – длина;  $x$  – текущая координата;  $b$  – ширина;  $h$  – толщина;  $R$ ,  $r$  – радиусы соответственно внешний и внутренний;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $W$  – момент сопротивления;  $J$  – момент инерции;  $J_p$  – полярный момент инерции;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $G$  – модуль сдвига;  $n$  – податливость;  $m$  – масса;  $g$  – ускорение силы тяжести [6–8].

Стержень (см. рис. 1, а) и полый цилиндр (см. рис. 1, б) с площадью поперечного сечения  $S$  имеют:

$$\delta = l\sigma / E; \quad \sigma = F / S; \quad n = \delta / F = l / (SE);$$

$$\varepsilon_1 = F / (SE) = \sigma / E; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\mu\varepsilon_1.$$

Консольный выступ (см. рис. 1, в) испытывает деформации чистого сдвига и изгиба одновременно. При этом

$$\delta_{\text{изг}} = 4Fl^3 / (Eb h^3), \text{ а } \delta_{\text{сдв}} = 2(1+\mu)fl / (Eb h),$$

то есть  $\delta_{\text{сдв}} / \delta_{\text{изг}} = 0,5(1+\mu)h^2 / l^2$ .

Отсюда условие преобладания сдвига есть  $l < h\sqrt{(1+\mu)/2}$ . Относительная деформация на всей поверхности боковых граней от сдвига  $\varepsilon = \delta_{\text{сдв}} / (2l)$ , а от изгиба  $\bar{\varepsilon} = 0$ . Допустимое усилие  $F$  определяется напряжением в заделке выступа, равным от изгиба  $\sigma = 6lF / (bh^2)$ , а от чистого сдвига  $\tau = 2(1+\mu)F / (bh)$ .

У кольца (см. рис. 2, з) прямоугольного сечения сила  $F$  ограничена допустимыми напряжениями  $\sigma_1 = +0,318rF / W$ ;  $\sigma_2 = -0,182rF / W$ , где  $W = bh^3 / 6$ . Прогиб по вертикали  $\delta_{\text{в}} = -0,149r^3 F / (EJ)$  и горизонтали  $\delta_{\text{г}} = +0,137r^3 Fl / (EJ)$ , где  $J = bh^3 / 12$ .

Консольная балка постоянного сечения (см. рис. 1, б) имеет

$$\delta(x) = \frac{l^3 F}{6EJ} \left( 3 - \frac{x}{l} \right) \left( \frac{x}{l} \right)^2;$$

при  $x = l$

$$\delta_l = \frac{l^3 F}{3EJ} \quad \text{и} \quad n_l = \frac{\delta_l}{F} = \frac{l^3}{3EJ},$$

где  $J = bh^3 / 12$ ;

$$\sigma(x) = lF(1 - x/l) / W,$$

где  $W = bh^2 / 6$ ;

$$\varepsilon(x) = \sigma(x) / E = 6Fl(1 - x/l) / (Eb h^2).$$

Консольная балка равного сопротивления (см. рис. 2, е):

$$\delta(x) = \frac{6Fl^3}{Eb h^3} \left( \frac{x}{l} \right)^2;$$

$$\delta_l = \frac{6F}{Eb} \left( \frac{l}{h} \right)^3 \quad \text{и} \quad n_l = \frac{\delta_l}{F} = \frac{6}{Eb} \left( \frac{l}{h} \right)^3;$$

$$\sigma(x) = \text{const} = Eh\delta_l / l^3; \quad J = bh^3 / 12; \quad n = 1,25l / (EJ).$$

Плоская спиральная пружина с числом витков  $\omega$ , толщиной и шириной витка соответственно  $h$  и  $b$ , с жестко заделанным наружным концом (см. рис. 2, а) имеет:

$$\varphi = Ml / (EJ); \quad l = \pi(r_{\text{в}} + r_{\text{ви}})\omega; \quad J = bh^3 / 12; \quad n = \varphi / M = 1,25l / (EJ).$$

То же, но с шарнирной заделкой наружного конца (см. рис. 2, б):

$$\varphi = 1,25Ml / (EJ); \quad n = \varphi / M = 1,25l / (EJ).$$

Сплошной круглый вал (см. рис. 2, в) или подвес круглого сечения:

$$\varphi = Ml / (GJ_p); \quad G = 0,5E / (1+\mu); \quad J_p = \pi R^4 / 2;$$

$$n = \varphi / M = l / (Gl_p); \quad \tau = MR / J_p = 2M / (\pi R^3) = GR\varphi / l;$$

Полый круглый вал (см. рис. 2, з):

$$J_p = \frac{\pi}{2}(R^4 - r^4); \quad \varphi = \frac{2Ml}{G\pi(R^4 - r^4)};$$

$$\tau = \frac{GR\varphi}{l} = \frac{2MR}{\pi(R^4 - r^4)}; \quad \varepsilon = \frac{R\varphi}{l}.$$

Растяжка на двух нитях радиуса  $R$  (см. рис. 2, д):

$$n = M/\varphi = \pi R^2(\sigma_0 a^2 + 2GR^2)/l;$$

$$\sigma = \sigma_0 + mg/(2\pi R^2); \quad \tau = GR\varphi/l,$$

где  $mg$  – вес подвижной части;  $\sigma_0$  – начальное напряжение в растяжках.

Торсион прямоугольного сечения (см. рис. 2, е) при  $h \ll b$ :

$$\varphi = \frac{Mlk_n}{3bh^3G}, \quad n = \frac{lk_n}{3Gb h^3}, \quad \tau = \frac{Gh\varphi}{l}k_\varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{h\varphi}{l}k_\varepsilon,$$

где  $k_n$  и  $k_\varepsilon$  зависят от отношения  $h/b$  так, как показано в табл. 1.

Мембраны, изображенные на рис. 3, при расчете подразделяют на пластины и пленки. Под пластиной понимают упругую перегородку, сопротивляющуюся изгибу благодаря своей собственной жесткости. Перегородка же из пленки не имеет собственной изгибной жесткости и приобретает упругие свойства только благодаря предварительному натяжению [9, 10]. Отличие расчета пластин (см. рис. 3) со сложным напряженным состоянием состоит в том, что в этом случае относительная деформация  $\varepsilon$  и напряжение  $\sigma$  уже не связаны простейшим соотношением  $\sigma = \varepsilon E$ . Так, для заделанной по контуру пластины (см. рис. 3, а) при воздействии на ее центр сосредоточенной силы  $F$  и отсутствии распределенного давления  $P$  прогиб ее центра, податливость центра, деформации и напряжения в пластине равны:

$$\delta_{\text{ц}} = \frac{3}{4} \frac{R^2(1-\mu^2)}{\pi h^3 E} F; \quad n_{\text{ц}} = \frac{3}{4} \frac{R^2(1-\mu^2)}{\pi h^3 E};$$

$$\delta(r) = n_{\text{ц}} F [1 - (r/R)^2 - 2(r/R)^2 \ln R/r];$$

$$\varepsilon_r(r) = n_{\text{ц}} F (1/\pi R/r - 1)(2h/R^2); \quad \varepsilon_v(r) = n_{\text{ц}} F (2h/R^2) \ln R/r;$$

$$\sigma_r(r) = \frac{3}{2} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \frac{F}{S} \left[ (1+\mu) \ln \frac{R}{r} - 1 \right];$$

Таблица 1

**Зависимость коэффициентов от отношения  $h/b$**

$h/b$	$k_n$	$1/k_\varepsilon$
0	1	1
0,1	1,067	1
0,3	1,233	1,009
1	2,370	1,481

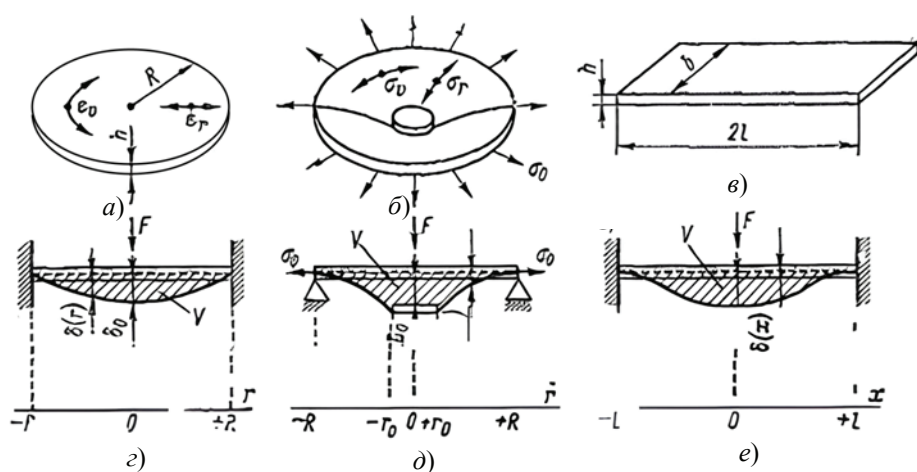


Рис. 3. Виды мембран

$$\sigma_v(r) = \frac{3}{2} \left( \frac{R}{h} \right)^2 \frac{F}{S} \left[ (1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - \mu \right],$$

где  $S = \pi R^2$ .

При воздействии давления  $P$  и  $F = 0$

$$\delta(r) = 0,25 n_{\text{ц}} P S \left[ 1 - (r/R)^2 \right]^2,$$

где  $n_{\text{ц}} = 0,75 R^2 (1 - \mu^2) / (\pi h^3 E)$ ;

$$\varepsilon_r(r) = \frac{1}{2} n_{\text{ц}} P S \frac{h}{R^2} \left[ 1 - 3 \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]; \quad \varepsilon_v(r) = \frac{1}{2} n_{\text{ц}} P S \frac{h}{R^2} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right];$$

$$\sigma_r(r) = \frac{3}{8} \left( \frac{R}{h} \right)^2 (1 - \mu) \left[ 1 - \frac{3 + \mu}{1 + \mu} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] P;$$

$$\sigma_v(r) = \frac{3}{8} \left( \frac{R}{h} \right)^2 (1 - \mu) \left[ 1 - \frac{3\mu + 1}{\mu + 1} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] P.$$

Для пленки с жестким центром и предварительным всесторонним натяжением  $\sigma_0$  (см. рис. 3, б) при воздействии сосредоточенной силы  $F$  ( $P = 0$ )

$$\delta(r) = \frac{F \ln(R/r)}{2\pi h \sigma_0},$$

а при воздействии давления  $P = (F = 0)$

$$\delta(r) = \frac{P R^2}{4h \sigma_0} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right].$$

Для пластины (см. рис. 3, в), заделанной по концам размера  $2l$  без предварительного натяжения, податливость при воздействии сосредоточенной силы  $F$  в центре равна:

$$n_{\Pi} = 12l^3 / (Ebh^3) \quad \text{при } b \gg l$$

и

$$n_{\Pi} = 12l^3 (1 - \mu^2) / (Ebh^3) \quad \text{при } b \ll l.$$

Прогиб и относительная деформация при воздействии сосредоточенной силы  $F$ :

$$\delta(x) = \frac{n_{\Pi} F}{24} \left[ 1 - 3 \left( \frac{x}{l} \right)^2 + 2 \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right];$$

$$\varepsilon(x) = \frac{n_{\Pi} F h}{8l^2} \left( 1 - 2 \frac{x}{l} \right),$$

а при действии давления  $P (F = 0)$ :

$$\delta(x) = \frac{P n_{\Pi} b l}{24} \left[ 1 - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right];$$

$$\varepsilon(x) = \frac{P n_{\Pi} b h}{12l} \left[ 1 - 3 \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right].$$

Для пленки (см. рис. 3, в) при натяжении вдоль размера  $2l$  усилием  $F_0 = \sigma_0 b h$  прогиб под действием давления  $P$  составляет:

$$F_0 = \sigma_0 b h; \quad \delta(x) = \frac{P l^2}{2 \sigma_0 h} \left[ 1 - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right],$$

а при действии силы  $F$ , сосредоточенной по линии  $x = 0$ ,

$$\delta(x) = \frac{l F}{2 \sigma_0 b h} \left( 1 - \frac{x}{l} \right).$$

Приведенные соотношения справедливы и для натянутой ленточной струны. При одновременном действии как сосредоточенной силы, так и распределенного давления зависимости  $\delta(x)$  и  $\varepsilon(x)$  получаются в результате сложения частных отклонений и растяжений. Приведенные соотношения для мембран с предварительным напряжением  $\sigma_0$  справедливы лишь до некоторого минимального предела  $\sigma_{0\min}$ , когда упругость элемента при предпосылке «натянутая пленка без изгибной жесткости» равна упругости при предпосылке «упругая на изгиб пластина без предварительного напряжения» [11]. Например, для ленточной пленки (см. рис. 3, в) податливость равна  $n_{\Pi} = l / (2 \sigma_0 b h)$ , а для пластины (балки) с заделками на обоих концах  $n_{\Pi} = l^3 (1 - \mu^2) / (2 E b h^3)$ . Приравнявая эти податливости, получаем

$$\sigma_{0\min} = \frac{E}{1 - \mu^2} \left( \frac{h}{l} \right)^2, \text{ то есть для напряжений } \sigma_0 < \sigma_{0\min} \text{ мембрану следует рас-}$$

смаатривать как пластину, а для напряжений  $\sigma_0 > \sigma_{0\min}$  – как пленку.

При использовании мембран (см. рис. 3) в датчиках давления или акустических микрофонах для расчета динамики необходимо учитывать связи между параметрами механического возбуждения в центре мембраны ( $F$ ,  $\delta_0$ ,  $v$ ) и параметрами возбуждаемого акустического поля – давлением  $P$  и объемным расходом

$q = dV/dt$  в замембранном пространстве (где  $V$  – объем, заштрихованный на рис. 3). Для этого мембрана может быть представлена эквивалентной механической схемой (см. рис. 3,  $\varepsilon$ ) и схемой аналога (см. рис. 3,  $\delta$ ), где часть входного усилия  $F$  посредством податливости  $n$  передается на корпус (через заделку), а другая часть посредством акустической податливости  $n_{\text{ак}}$  приводит в движение жесткий поршень без массы [12, 13].

Существует множество методик, которые могут быть применены при разработке датчиков для измерения следующих свойств:

- термических – методика для измерения температуры, теплопроводности, теплоемкости. Данный метод основан на применении термопар, терморезисторов и других термических датчиков;

- оптических – методика для измерения световых, цветовых и спектральных характеристик. Метод основан на использовании фотодетекторов, фотоэлектрических и оптических спектрометров, а также других оптических датчиков;

- электромагнитных – методика для измерения электрических и магнитных характеристик. Метод основан на использовании электромагнитных датчиков, таких как датчики тока, напряжения, электрического поля и магнитного поля;

- механических – методика, используемая для измерения массы, давления, ускорения, угла поворота и других механических характеристик. Метод основан на применении механических датчиков, таких как весы, датчики давления, гироскопы и акселерометры;

- химических – применяется методика для измерения концентрации, pH, остаточного количества кислорода и других химических характеристик. Этот метод основан на использовании химических и биохимических датчиков, таких как микросенсоры, биосенсоры, флюоресцентные датчики и датчики, работающие на основе нанотехнологий.

Энергетический метод позволяет определить перемещения любых упругих систем. Для систем, собранных из большого количества элементов, сохраняется тот же порядок расчета, но общий объем расчетов многократно увеличивается.

Порядок расчета перемещений таких систем следующий:

- показать грузовую и единичную системы;
- единичную систему нагрузить единичной силой в точке, где находим деформацию направления перемещения;
- разделить грузовую и единичную системы на отдельные элементы;
- определить внутренние усилия в элементах системы для грузового и единичного состояний;
- определить перемещение с помощью интеграла Мора.

Для определения внутренних усилий в элементах системы ее надо разобрать и рассмотреть силы, действующие на каждый элемент в отдельности. Интеграл Мора для определения перемещения сложной системы принимает вид, где первое слагаемое учитывается в виде растяжения стержней в перемещение, второе – растяжения пружин и третье – изгиба балок.

Определим перемещение системы, состоящей из двух балок, связанных пружиной и стержнем (рис. 4).

Приведем исходные данные для расчета системы при нагрузке  $F = 5$  кН (все элементы системы стальные):

- для стержня: модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; длина стержня  $L_{\text{ст}} = 20$  см; сторона квадратного сечения стержня  $a = 5$  мм; площадь сечения  $A = a^2$ ;  $A = 0,25$  см<sup>2</sup>;



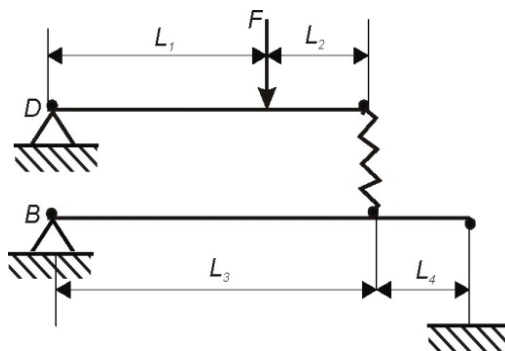


Рис. 4. Заданная система из нескольких элементов

– для балок (сечения двух балок одинаковые): длины участков балок, см:  $L_1=20$ ,  $L_2=10$ ,  $L_3=30$ ,  $L_4=10$ ; высота  $h = 2$  см и ширина  $b = 4$  см сечения балок; моменты инерции  $J$  и сопротивления  $W$  сечения балок:  $J = \frac{bh^3}{12}$ ,  $W = \frac{bh^2}{6}$ ,  $J = 2,667 \text{ см}^4$ ,  $W = 2,667 \text{ см}^3$ ; жесткость пружины  $K_{\text{пр}} = 100 \text{ Н/мм}$ .

В примере определяются два перемещения системы: линейное перемещение точки приложения силы  $F$  и угловое перемещение на опоре  $D$ .

Для каждого перемещения показана своя единичная система (рис. 5). Для определения внутренних усилий разберем на отдельные элементы каждую из представленных систем – грузовую или заданную (см. рис. 5, а) и две единичные (см. рис. 5, б) и из уравнений равновесия каждого элемента определим внутренние усилия. Детализировка грузовой и второй единичной системы показаны на рис. 6. Для первой единичной системы усилия пропорциональны усилиям в грузовой системе (см. рис. 6, а), так как точки приложения нагрузки и направления нагрузок совпадают.

Приведем усилия в стержне и пружине для определения перемещения точки приложения силы:

– в грузовом состоянии:

$$N_1 = \frac{FL_1}{L_1 + L_2}; \quad N_2 = \frac{N_1 L_3}{L_3 + L_4}; \quad N_1 = 3,33 \text{ кН}; \quad N_2 = 2,5 \text{ кН};$$

– в единичном состоянии (см. рис. 6, б) для  $\Delta F_{\text{верт}}$ :

$$N_{11} = \frac{L_1}{L_1 + L_2}; \quad N_{21} = \frac{N_{11} L_3}{L_3 + L_4}; \quad N_{11} = 0,667; \quad N_{21} = 0,5;$$

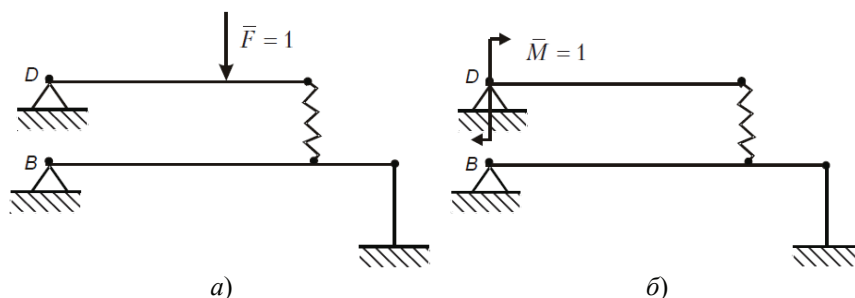


Рис. 5. Единичные системы для определения  $\Delta F_{\text{верт}}$  (а) и  $\theta_D$  (б)

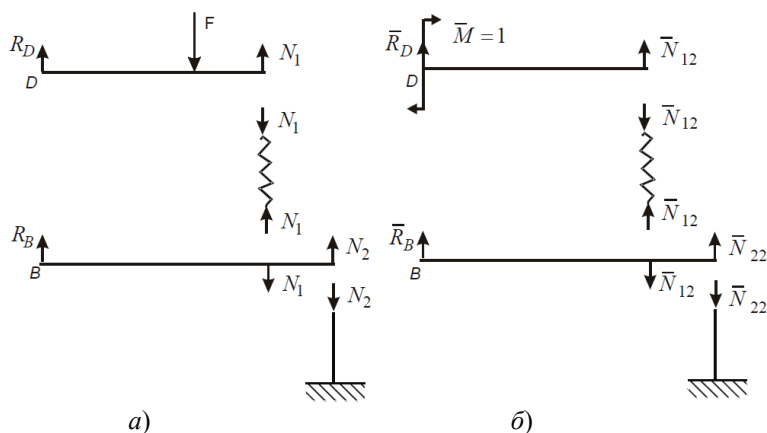


Рис. 6. Разбиение на элементы грузовой (а) и единичной (б) систем для  $\theta_D$

– в единичном состоянии для  $\theta_D$ :

$$N_{12} = \frac{1}{L_1 + L_2}; \quad N_{22} = \frac{N_{12}L_3}{L_3 + L_4}; \quad N_{12} = 3,333 \text{ м}^{-1}; \quad N_{22} = 2,5 \text{ м}^{-1}.$$

Определим опорные реакции и изгибающие моменты в балках:

– в грузовом состоянии:

$$R_A = F - N_1; \quad R_B = N_1 - N_2; \quad R_A = 1,667 \text{ кН}; \quad R_B = 0,833 \text{ кН};$$

– в единичном состоянии для  $\Delta F_{\text{верт}}$ :

$$R_{11A} = 1 - N_{11}; \quad R_{11B} = N_{11} - N_{21}; \quad R_{11A} = 0,333; \quad R_{11B} = 0,167;$$

– в единичном состоянии для  $\theta_D$ :

$$R_{12A} = -N_{12}; \quad R_{12B} = N_{12} - N_{22}; \quad R_{12A} = -3,333 \text{ м}^{-1}; \quad R_{12B} = 0,833 \text{ м}^{-1}.$$

Изгибающие моменты на четырех участках двух балок:

– от внешних сил

$$M(x) = \begin{pmatrix} R_A x \\ N_1 x \\ R_B x \\ N_2 x \end{pmatrix};$$

– от единичной силы  $\bar{F} = 1$

$$M_{11}(x) = \begin{pmatrix} R_{11A} x \\ N_{11} x \\ R_{11B} x \\ N_{21} x \end{pmatrix};$$

– от единичного момента  $\bar{M} = 1$

$$M_{12}(x) = \begin{pmatrix} R_{12A} x \\ N_{12} x \\ R_{12B} x \\ N_{22} x \end{pmatrix}, \quad n = \text{rows}(L); \quad n = 4.$$

Ввиду многообразия возможных систем общего решения для них получить не удастся. Уравнения равновесия проще записать вручную и вставить их в расчет. Подставив найденные усилия в интеграл Мора, находим искомые перемещения  $\Delta F_{\text{верт}}$  и  $\theta_D$ :

– статическое перемещение точки приложения силы  $\Delta F_{\text{верт}}$ :

$$\Delta F = \frac{N_1 N_{11}}{K_{\text{пр}}} + \frac{N_2 N_{21}}{EA} L_{\text{ст}} + \sum_{k=1}^n \int_0^{L_k} \frac{M(x) M_{11}(x)}{EJ} dx; \quad \Delta F = 31,9 \text{ мм};$$

– угол поворота заданной точки  $D$   $\theta_D$ :

$$\theta_D = \frac{N_1 N_{12}}{K_{\text{пр}}} + \frac{N_2 N_{22}}{EA} L_{\text{ст}} + \sum_{k=1}^n \int_0^{L_k} \frac{M(x) M_{12}(x)}{EJ} dx; \quad \theta_D = 8^\circ;$$

– максимальное напряжение в баллах:

$$\max M = \max \left( \left( \frac{R_A L_1}{R_B L_3} \right) \right); \quad \max \sigma = \frac{\max M}{W}; \quad \max \sigma = 125 \text{ МПа}.$$

Отметим, что универсальную программу для расчета сложных систем составить невозможно, ввиду многообразия вариантов набора элементов. Расчеты простые, но их очень много. Таким же образом, разбивая систему на элементы, можно решить и статически неопределимую систему, но объем расчетов при этом значительно возрастет.

### Заключение

Разработка датчиков – сложный процесс, который включает в себя несколько этапов. Одним из ключевых этапов является определение оптимальной конструкции чувствительного элемента. Это позволяет достичь высокой точности измерений, снизить затраты на производство и эксплуатацию.

Выбор оптимальной конструкции предполагает испытания при разных температурах, что позволяет оценить термостабильность датчика в реальных условиях эксплуатации, механические испытания для определения стойкости датчика к вибрациям, ударам и другим механическим воздействиям, определение скорости реакции, что важно для автоматизированных процессов, так как позволяет оценить быстроту отклика датчика на изменения измеряемой величины, измерение линейности необходимо для оценки точности реакции датчика на изменения в пределах диапазона измерений. Кроме того, необходимо использовать комплексный подход, который учитывает различные нагрузки и пространственное расположение датчика.

При выборе конструкции чувствительного элемента необходимо учитывать следующие факторы: вид измеряемой величины, точность и диапазон измерений, стабильность работы, метрологические характеристики, устойчивость к внешним воздействиям, стоимость производства.

### Список литературы

1. Пивкин, А. Г. Волоконно-оптические датчики давления аттенуаторного типа для космической техники / А. Г. Пивкин, Т. И. Мурашкина. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2005. – 146 с.
2. Основные проблемы проектирования информационно-измерительной датчиковой аппаратуры / Д. В. Панов, А. В. Гориш, С. А. Пономарев, Н. М. Пушкин // Актуальные проблемы защиты и безопасности: бронетанковая техника и вооружение : материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 03 – 06 апреля 2013 года. Том 3. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 371 – 379.

3. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по критериям точности, быстродействию, энергосбережению : монография / В. В. Сурков [и др.]. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2005. – 300 с.
4. Зыков, С. В. Разработка метода и определение нового условия безопасности движения в состоянии многопоточности на основе математического моделирования / С. В. Зыков, С. А. Золотухин, М. А. Золотухина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 3(47). – С. 98 – 114. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-7
5. Петрова, И. Ю. Концептуальная модель САПР чувствительных элементов на основе энергоинформационного метода / И. Ю. Петрова, А. А. Ветрова // Датчики и системы. – 2004. – № 2. – С. 13 – 16.
6. Научно-технические, технологические и практические основы конструирования датчиковой аппаратуры для измерений физических величин : монография : в 5 т. / [А. Ю. Акимов и др.] ; под общ. ред. А. Н. Перминова ; под ред. А. В. Гориша [и др.]. – Москва : Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2011. – Т. 1. – 579 с.
7. Шикульская, О. М. Метод моделирования чувствительных элементов датчиков на основе фрактального подхода : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.18 / Шикульская Ольга Михайловна. – Астрахань, 2009. – 32 с.
8. Мусаев, Р. Ш. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, М. А. Фролов // Датчики и системы. – 2014. – № 7(182). – С. 22 – 25.
9. Топильский, В. Б. Оценка погрешности дифференциального емкостного датчика перемещений / В. Б. Топильский, Е. И. Бажанов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2012. – № 4(96). – С. 88–89.
10. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimIn Tech / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 3(37). – С. 48 – 53. doi: 10.21685/2307-5538-2021-3-6
11. Методика расчета специального упругого элемента датчиков / А. И. Тихонов, Е. А. Мокров, С. А. Тихонов [и др.] // Датчики и системы. – 2001. – № 7. – С. 21 – 23.
12. Батищев, В. И. Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения / В. И. Батищев, В. С. Мелентьев. – Москва : Машиностроение-1, 2005. – 123 с.
13. Выскуб, В. Г. Устройства и системы автоматического управления высокой точности = High-precision devices and systems of automatic control / В. Г. Выскуб, В. И. Сырякин, В. С. Шидловский. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2009. – 307 с.

---

## Models and Methods to Determine the Optimal Design of a Sensing Element for Sensor Equipment

G. A. Anuar 

*Department of Space Technology and Engineering,  
L. N. Gumilyov Eurasian National University, galym\_rma@mail.ru;  
Astana, Republic of Kazakhstan*

**Keywords:** sensor; measurement range; optimal design; stability of characteristics; sensing element.

**Abstract:** To determine the optimal design of a sensing element, several methods used in sensor development are considered. The analysis results demonstrate the need to consider various factors, such as the measured value, measurement accuracy and range, stability, resistance to external influences, cost, etc. A method for measuring the linearity of a sensing element allows one to evaluate how the sensor responds to changes in the measured value within its range. The selection of elastic elements is based on the required characteristics. A comprehensive approach to solving the technical problem takes into account various loads and the spatial arrangement of the sensor. It has been proven that improving the accuracy of design calculations ensures maximum sensor sensitivity and prevents unacceptable stress. It has been noted that an optimal design of the sensing element enables high measurement accuracy and reduces production and operating costs.

### References

1. Pivkin A.G., Murashkina T.I. *Volokonno-opticheskiye datchiki davleniya attenyuatorsnogo tipa dlya kosmicheskoy tekhniki* [Fiber-optic pressure sensors of the attenuator type for space technology], Penza : IITS PGU, 2005, 146 p. (In Russ.)
2. Panov D.V., Gorish A.V., Ponomarev S.A., Pushkin N.M. *Aktual'nyye problemy zashchity i bezopasnosti: bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye: materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of protection and security: armored vehicles and weapons: materials of the XVI All-Russian scientific and practical conference], St. Petersburg, 03-06 April 2013, vol. 3, St. Petersburg, 2013, pp. 371-379. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Surkov V.V. [et al.]. *Analiticheskoye konstruirovaniye optimal'nykh regulyatorov po kriteriyam tochnosti, bystrodeystviyu, energosberezheniyu: monografiya* [Analytical Design of Optimal Controllers Based on Accuracy, Speed, and Energy Saving Criteria: Monograph], Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2005, 300 p. (In Russ.)
4. Zykov S.V., Zolotukhin S.A., Zolotukhina M.A. [Development of a Method and Definition of a New Condition for Traffic Safety in a Multithreaded State Based on Mathematical Modeling], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, and Networks in Economics, Engineering, Nature, and Society], 2023, no. 3(47), pp. 98-114. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-7 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Petrova I.Yu., Vetrova A.A. [Conceptual model of CAD of sensitive elements based on the energy-information method], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2004, no. 2, pp. 13-16. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Akimov A.Yu [et al.]; Perminov A.N. (Ed.); Gorish A.V. [et al.] (Eds.), *Nauchno-tekhnicheskiye, tekhnologicheskkiye i prakticheskkiye osnovy konstruirovaniya datchikovoy apparatury dlya izmereniy fizicheskikh velichin: monografiya* [Scientific, technical, technological and practical foundations of designing sensor equipment for measuring physical quantities: monograph], in 5 vols., Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gos. universiteta lesa, 2011, vol. 1, 579 p. (In Russ.)
7. Shikul'skaya O.M. *PhD of Doctor's thesis (Engineering)*, Astrakhan', 2009, 32 p. (In Russ.)
8. Musayev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. [Simulation modeling of a sensitive element of a string-type pressure sensor], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2014, no. 7(182), pp. 22-25. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Topil'skiy V.B., Bazhanov Ye.I. [Estimation of the error of a differential capacitive displacement sensor], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2012, no. 4(96), pp. 88-89. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh.Zh., Mishukov S.V. [Modeling of Measurement Circuits Capacitive Sensors in the SimInTech Environment], *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control], 2021, no. 3(37), pp. 48-53. doi: 10.21685/2307-5538-2021-3-6 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Tikhonov A.I., Mokrov Ye.A., Tikhonov S.A. [et al.], [Methodology for calculating a special elastic element of sensors], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2001, no. 7, pp. 21-23. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Batishchev V.I., Melent'yev V.S., *Izmereniye parametrov yemkostnykh datchikov polozheniya i peremeshcheniya* [Measuring the parameters of capacitive position and displacement sensors], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2005, 123 p. (In Russ.)

13. Vyskub V.G., Syryamkin V.I., Shidlovskiy V.S. *Ustroystva i sistemy avtomaticheskogo upravleniya vysokoy tochnosti* [High-precision devices and systems of automatic control], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2009, 307 p. (In Russ.)

---

### **Modelle und Verfahren zur Bestimmung des optimalen Designs eines Sensorelements für Sensoreinrichtungen**

**Zusammenfassung:** Zur Bestimmung des optimalen Designs eines Sensorelements sind verschiedene Methoden der Sensorentwicklung betrachtet. Die Analyse zeigt die Notwendigkeit, diverse Faktoren wie Messwert, Messgenauigkeit und -bereich, Stabilität, Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen, Kosten und andere zu berücksichtigen. Ein Verfahren zur Messung der Linearität des Sensorelements ermöglicht die Bewertung des Sensorverhaltens bei Änderungen des Messwerts innerhalb seines Messbereichs. Die Auswahl elastischer Elemente basiert auf den erforderlichen Eigenschaften. Es ist ein umfassender Ansatz zur Lösung des technischen Problems vorgestellt, der verschiedene Belastungen und die räumliche Anordnung des Sensors berücksichtigt. Es ist gezeigt, dass die Verbesserung der Genauigkeit der Auslegungsberechnungen eine maximale Sensorempfindlichkeit gewährleistet und das Auftreten unzulässiger Spannungen verhindert. Das optimale Sensorelementdesign ermöglicht eine hohe Messgenauigkeit und reduziert Produktions- und Betriebskosten.

---

### **Modèles et méthodes pour la détermination de la conception optimale d'un élément de détection pour instruments de mesure**

**Résumé:** Pour déterminer la conception optimale de l'élément de détection, sont examinées plusieurs techniques utilisées pour la conception des capteurs. Les résultats de l'analyse montrent la nécessité de prendre en compte de différents facteurs tels que la valeur mesurée, la précision et la plage de mesure, la stabilité, la résistance aux influences extérieures, le coût, etc. La méthode de mesure de la linéarité de l'élément de détection permet d'évaluer la façon dont le capteur réagit à la variation de la valeur mesurée dans son diamètre. Le choix des éléments élastiques est effectué en tenant compte des caractéristiques requises. Une approche intégrée de la résolution d'un problème technique est présentée, en tenant compte des différentes charges et de la disposition spatiale du capteur. Est prouvé que l'amélioration de la précision du calcul de la conception permet de maximiser la sensibilité du capteur et d'éviter les tensions non admissibles. Il est à noter que la conception optimale de l'élément de détection permet d'obtenir une grande précision de mesure et de réduire les coûts de production et d'exploitation.

---

**Автор: Ануар Галымжан Амандыкович** – старший преподаватель кафедры «Космическая техника и технология», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Астана, Республика Казахстан.

## КВАЗИТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ И МАССОПЕРЕНОС ЧАСТИЦ ПРИ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД

В. Н. Долгунин✉, А. А. Жило, А. Н. Куди,  
В. А. Пронин, А. Г. Тараканов

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,  
dolgunin-vn@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** гравитационное течение; доля пустот; зернистая среда; квазидиффузия; температура зернистой среды; уравнение состояния.

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментального и аналитического исследований структурных и кинематических параметров сдвигового гравитационного потока несвязных неэластичных сферических частиц зернистых материалов в состоянии высокой дилатансии. На базе уравнения состояния, устанавливающего взаимосвязь структурных и кинематических параметров, проанализирована значимость различных форм взаимных перемещений частиц (сдвигового перемещения, хаотических флуктуаций и поперечного массопереноса) в формировании структуры быстрого гравитационного потока зернистой среды. Установлено, что в большей части потока на шероховатом скате доминирующая роль принадлежит сдвиговому перемещению частиц. Хаотические флуктуации и поперечный массоперенос, определяющие интенсивность квазидиффузионных эффектов взаимодействия частиц, приобретают первостепенное значение в области потока с высокой дилатансией в верхней части слоя. Интенсификация квазидиффузионных эффектов путем повышения интенсивности гравитационного сдвига возможна при варьировании углом ската в узком диапазоне. Сделан вывод о целесообразности интенсификации квазидиффузионных эффектов взаимодействия частиц под действием квазитеплогового потока, генерируемого продольными импульсами, распределенными на открытой поверхности слоя материала на скате. Проведен анализ варианта обеспечения условий для квазидиффузионного взаимодействия частиц при комплексном воздействии гравитационного сдвига и тангенциальных импульсов.

---

### Введение

Зернистые материалы являются одним из основных объектов, изучаемых в рамках физики конденсированного состояния веществ [1]. В настоящее время физика конденсированного состояния сформировалась как быстро развивающаяся междисциплинарная область знания, имеющая множество научных и практических приложений. Это в полной мере относится к физике конденсированного состояния зернистых материалов, свойства которых столь неоднозначны, что в зависимости от динамических условий и масштаба объекта они проявляют себя как твердое вещество, жидкость или газ с необычными свойствами, что указывает на мезоскопический характер объектов [2].



Одним из наиболее распространенных состояний зернистых материалов в природных явлениях и технологических процессах является состояние быстрого гравитационного сдвига. Быстрые сдвиговые течения зернистых материалов существенно влияют на рельеф поверхности Земли (базальные течения, камнепады, сели, дюны), кинетику явлений переноса в технологических процессах и качество продукта. В технологических процессах быстрые гравитационные течения зернистых материалов образуются на естественных откосах и наклонных поверхностях в буртовых хранилищах и транспортных устройствах, а также в рабочих объемах оборудования, силосов и расходных бункеров в химических, пищевых, горно-обогатительных, сельскохозяйственных, металлургических и многих других производствах. В быстрых гравитационных потоках зернистых материалов под действием быстрой сдвиговой деформации, напряжения генерируются преимущественно в результате обмена частиц ударными импульсами и их массопереноса через поверхность сдвига [3].

Динамические условия взаимодействия частиц при быстром сдвиге характеризуются кратковременными точечными контактами, что принципиально отличается их от условий взаимодействия частиц при «медленном» квазипластическом сдвиговом течении зернистых материалов. В условиях квазипластического течения взаимодействие частиц происходит при относительно длительных контактах, динамика которых определяется преимущественно эффектами трения скольжения и качения. В связи с изложенным, для описания названных видов течений зернистых сред используются принципиально различные реологические модели [2, 3], в соответствии с которыми медленный сдвиг представляется как необратимая квазистатическая пластическая деформация, а быстрый сдвиг – как псевдовязкостное течение с ярко выраженными эффектами дилатансии. Последнее свидетельствует о проявлении зернистыми материалами мезоскопических свойств, обнаруживающих в их поведении определенную аналогию с неньютоновской жидкостью и газом. Это указывает на целесообразность анализа быстрых сдвиговых течений зернистой среды с позиций физики конденсированного состояния [1, 2, 4].

Теоретическому и экспериментальному исследованию быстрых гравитационных течений зернистых материалов посвящено большое количество работ, например [2 – 10]. Однако многие авторы, например [3 – 6], отмечают, что несмотря на большой научный и практический интерес к изучению гравитационных течений, до настоящего времени отсутствуют достаточно полные определяющие соотношения для их математического описания. Это является препятствием на пути развития общей модели динамики быстрых гравитационных течений [2, 4, 5]. Проблема формулировки определяющих соотношений во многом связана со сложностью выражения зависимости динамических характеристик взаимодействия частиц, кинетической энергии их хаотических колебаний и вращения от углов и скоростей взаимного столкновения.

По этой причине в некоторых работах, например [2, 4], выражается мнение о том, что разработке адекватного описания динамики разреженных быстрых гравитационных потоков с высокой неоднородностью могут способствовать математические модели, построенные с использованием феноменологических соотношений, которые позволят устанавливать взаимосвязь структурных и кинематических параметров сдвиговых потоков зернистых сред. Однако разработка такого рода моделей находится только в самой начальной стадии.

Мезоскопический масштаб частиц зернистой среды предполагает широкое использование при описании динамики быстрого сдвигового течения физической аналогии между хаотическим перемещением частиц и тепловым движением молекул. При наличии такой аналогии появляется возможность использовать хорошо разработанную кинетическую теорию для описания динамики быстрых сдвиговых течений. Это подтверждается результатами успешного использования во

многих работах [3, 8, 10, 11] основных положений кинетической теории газа для решения задач динамики быстрых сдвиговых течений зернистых материалов. Однако в работе [3] на основе анализа обстоятельств, затрудняющих использование кинетической теории для решения практических задач в отношении зернистых сред, сделан вывод о том, что названная теория в прикладном ее аспекте нуждается в существенном развитии. В первую очередь это относится к определению температуры, как универсального термодинамического параметра состояния среды. В качестве аналогичной характеристики состояния зернистой среды в условиях быстрой сдвиговой деформации используется параметр, называемый температурой зернистой среды [3]. Однако между температурой зернистой среды и классической термодинамической температурой существует только формальная аналогия. В отличие от термодинамической температуры, которая является скалярным изотропным параметром, температура зернистой среды характеризуется альтернативными свойствами [10]. В частности, результаты исследования, проведенного в работе [12], свидетельствуют об анизотропных свойствах температуры зернистой среды, причем характер анизотропности зависит от параметров внешнего динамического воздействия на зернистую среду и ее физико-механических свойств.

Традиционно температуру зернистой среды определяют в виде осредненного мгновенного значения квадрата скорости флуктуаций частиц [3], то есть как величину, пропорциональную кинетической энергии хаотических перемещений частиц. В рамках настоящей статьи проводится анализ температуры зернистой среды, представленной в виде комплексного параметра, характеризующего кинетическую энергию различных форм взаимных перемещений частиц в быстрых сдвиговых гравитационных потоках. В определенной степени такое определение температуры способствует позиционированию ее как анизотропного параметра. Составляющие температуры используются для анализа структурно-кинематических характеристик потока на базе уравнения состояния зернистой среды.

Уравнение состояния устанавливает взаимосвязь между дилатансией  $\bar{\varepsilon}$ , давлением  $p$  и температурой зернистой среды  $E$ , которое формально аналогично известному закону состояния плотного газа [10]:

$$p \bar{\varepsilon} = \chi E, \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент уравнения состояния.

Результаты исследования вклада составляющих температуры используются для определения рациональных условий организации квазидиффузионной сепарации зернистых материалов по размеру и плотности.

### Материалы и методы

Высокая интенсивность взаимодействия частиц в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов становится причиной яркого проявления эффектов сепарации и перемешивания. [5, 10, 13]. Однако в отсутствие детальной информации о структурно-кинематических параметрах потока чрезвычайно осложняется анализ физических механизмов взаимодействия частиц, и принципиально невозможно обеспечить достаточно точное прогнозирование динамики распределения неоднородных частиц.

Вследствие такой ситуации до настоящего времени сохраняется высокая потребность в достоверных экспериментальных данных по динамике быстрых гравитационных течений. Достоверная детальная информация о структурных и кинематических параметрах потока необходима не только для верификации математических моделей течений, но и анализа физических механизмов эффектов сепарации и перемешивания частиц.

В работе [14] предложен экспериментально-аналитический метод определения локальных значений скорости и порозности (объемной доли пустот) в быстром гравитационном потоке зернистого материалов на шероховатом скате. Среди важных достоинств метода следует выделить возможность его параллельного использования для исследования эффектов взаимодействия неоднородных частиц в быстром гравитационном потоке. В соответствии с методом, экспериментальную информацию получают путем организации установившегося гравитационного потока зернистого материала на шероховатом скате, выполненном в виде желоба прямоугольного сечения, и сбора ссыпающихся частиц в горизонтальную кювету, разделенную поперечными перегородками на ячейки.

Экспериментальная информация включает высоту слоя  $h$  на пороге ссыпания ската, угол его наклона, время ссыпания материала  $t$ , функцию распределения массы ссыпавшихся частиц  $G(x_1)$  по ячейкам кюветы (вдоль соответствующей горизонтальной координаты  $x_1$ ) и высоту расположения порога ссыпания ската над кюветой  $H$ . Информацию о локальных скорости частиц и порозности в гравитационном потоке на шероховатом скате получают путем аналитической обработки экспериментальных данных. Анализ позволяет определить профили скорости  $u(y)$  и объемной доли пустот  $\varepsilon(y)$  по толщине слоя материала на скате  $y$  исходя из распределения частиц по ячейкам в кювете. Уравнения, связывающие профили  $u(y)$ ,  $\varepsilon(y)$  и функцию  $G(x_1)$  в быстром гравитационном потоке частиц на шероховатом скате, записываются в следующем виде:

$$|\vec{u}| = \frac{x_1 - y \sin \alpha}{\cos \alpha \sqrt{(H + y \cos \alpha - (x_1 - y \sin \alpha) \tan \alpha) \frac{2}{g}}}; \quad (2)$$

$$u(y(x_1)) \rho(1 - \varepsilon(y)) = G(x_1), \quad (3)$$

где функция  $y(x_1)$  определяет взаимосвязь соответствующих координат.

Для определения профилей  $\varepsilon(y)$  и  $u(y)$  на базе зависимостей (2) и (3) образуют замкнутую систему уравнений путем добавления к ним уравнения состояния зернистой среды (1), в котором температура зернистой среды  $E$  является функцией скорости сдвига  $(du/dy)$ . Давление вычисляется как гравитационное литостатическое в зависимости от плотности частиц  $\rho$  и угла ската  $\alpha$

$$p(y) = \int_{h-y}^h \rho(1 - \varepsilon(y)) g \cos \alpha dy, \quad (4)$$

дилатансия определяется в виде следующей функции объемной доли пустот (порозности)  $\varepsilon$ :

$$\bar{\varepsilon}(y) = \frac{\varepsilon(y) - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon(y)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  — порозность насыпки частиц в отсутствие сдвиговой деформации.

При определении температуры зернистой среды приняты во внимание [10] три вида кинетической энергии взаимных перемещений частиц: вследствие хаотических флуктуаций  $E_{fl}$ , относительного сдвига  $E_{sh}$  и поперечного массопереноса  $E_{tr}$ :

$$E = E_{sh} + E_{fl} + E_{tr}. \quad (6)$$

Кинетическая энергия частиц, обусловленная их флуктуацией, выражается в следующем виде:

$$E_{fl} = \frac{1}{2} \rho (V')^2, \quad (7)$$

где  $V'$  – средняя скорость флуктуаций частиц, которая вычисляется как функция скорости сдвига, порозности и свойств частиц [10, 15].

Сдвиговая составляющая кинетической энергии частиц определяется как

$$E_{sh} = \frac{1}{2} \rho (bd)^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2, \quad (8)$$

где  $d$  – средний диаметр частиц;  $b$  – геометрический параметр (вычисляется как функция порозности) [10].

Удельная кинетическая энергия частиц, обусловленная их поперечным массопереносом в сдвиговом потоке, находится по формуле

$$E_{tr} = \frac{1}{4} \rho s V' \frac{du}{dy}, \quad (9)$$

где  $s$  – среднее расстояние между частицами, которое определяется как функция их диаметра и порозности [10, 14].

Уравнения (1) – (3) с учетом выражений (4) – (6) образуют замкнутую систему относительно функций  $u(y)$ ,  $\epsilon(y)$ ,  $y(x_1)$  и  $p(y)$ . Граничное условие для этой системы уравнений формулируется как условие «прилипания» частиц к шероховатому скату, если их координата по высоте слоя оказывается равной нулю, то есть

$$u(0) = 0; \quad y = 0. \quad (10)$$

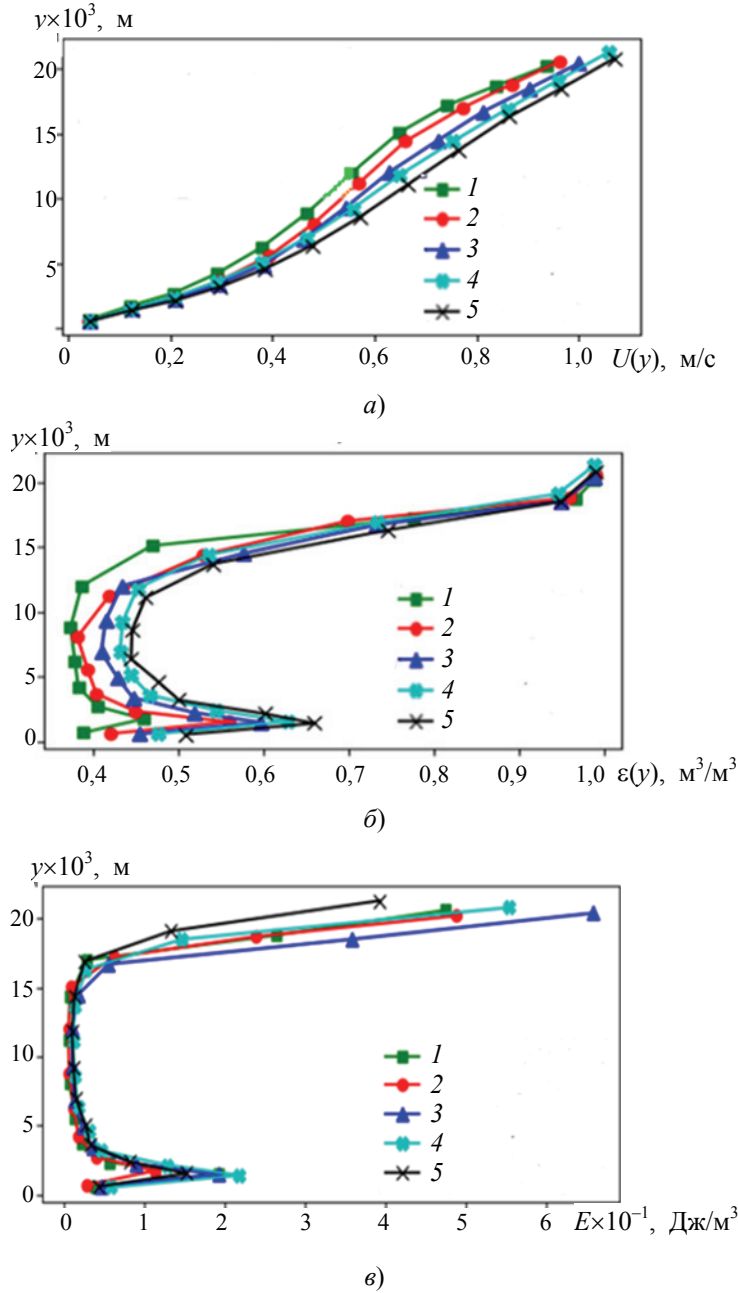
Достаточно высокие прогностические свойства метода подтверждены путем рентгенографического исследования структуры гравитационного потока [14].

Среди составляющих температуры наибольшей анизотропией характеризуются составляющие, обусловленные наличием у частиц сдвигового потока поперечного массопереноса и относительной сдвиговой скорости. Первая составляющая характеризуется доминированием поперечной ориентации в сдвиговом потоке, а вторая – продольной. Анализ температуры зернистой среды как структурированного параметра позволяет оценивать влияние на структурно-кинематические параметры сдвигового потока зернистой среды различного рода динамических условий и, как следствие, прогнозировать условия, способствующие проявлению технологически значимых эффектов взаимодействия частиц. С учетом того, что скорость флуктуаций  $V'$  пропорциональна скорости сдвига [10, 15], то, согласно выражениям (7) – (9), все составляющие температуры зернистой среды определяются в зависимости от квадрата скорости сдвига. Поскольку эффекты взаимодействия частиц (сепарации и перемешивания) зернистой среды зависят от интенсивности сдвигового воздействия, то соответственно температура зернистой среды является важным технологическим параметром.

В настоящей работе проведен анализ результатов исследований интегральных значений и составляющих температуры зернистой среды в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате [16] в зависимости от интенсивности сдвигового гравитационного воздействия. Интенсивность сдвигового воздействия варьировалась за счет изменения угла наклона ската  $\alpha$  и оценивалась величиной его относительного значения  $\sin \alpha / \sin \alpha_0$ , где  $\alpha_0$  – угол естественного откоса материала. Результаты получены представленным экспериментально-аналитическим методом [10, 14] с применением стеклянного бисера фракции 3,5...3,75 мм, как модельного материала, при постоянном удельном его расходе на единицу длины сыпного порога ската, равном  $0,95 \text{ кгм}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1 представлены профили скорости, доли пустот и температуры зернистой среды в быстрых гравитационных потоках бисера при различных углах наклона шероховатого ската.



**Рис. 1. Профили скорости (а), доли пустот (б) и интегральной температуры зернистой среды (в) в потоке стеклянного бисера на шероховатом скате в зависимости от интенсивности гравитационного сдвигового воздействия – относительного значения угла ската  $\sin \alpha / \sin \alpha_0$ : 1 – 1,02; 2 – 1,05; 3 – 1,09; 4 – 1,12; 5 – 1,16**

Представленные профили имеют характерную для быстрых гравитационных течений форму [10, 13 – 16], которая объясняется интенсивным сдвиговым воздействием на среду вблизи основания и низким литостатическим давлением вблизи открытой поверхности слоя.

С повышением интенсивности гравитационного воздействия наблюдается эволюция формы профилей скорости (см. рис. 1, *а*) от S-образной к прямолинейной. При этом скорость сдвига в центральной части потока изменяется только в небольшой степени, а наибольшие ее изменения наблюдаются в периферийных областях потока. Важно отметить, что вариация скорости сдвига в периферийных областях протекает в противоположных направлениях. С увеличением угла ската скорость сдвига у основания слоя увеличивается, в то время как вблизи открытой его поверхности скорость сдвига уменьшается, что, очевидно, связано с увеличением коэффициента внутреннего псевдовязкостного трения при возрастании доли пустот в верхней части слоя (см. рис. 1, *б*).

При анализе профилей  $\varepsilon(y)$  и  $E(y)$  в первую очередь обращает на себя внимание высокая степень аналогии профилей доли пустот и температуры (см. рис. 1, *б*, *в*). Наблюдаемая аналогия является следствием прямой корреляции дилатансии потока с температурой зернистой среды в соответствии с уравнением состояния (1). При этом увеличение температуры от центра слоя к основанию объясняется возрастанием скорости сдвига, которая в соответствии с выражениями (7) – (9) прямо определяет величину всех составляющих температуры. Наиболее высокие значения температуры в области слоя, прилегающей к открытой поверхности потока, являются следствием совокупного эффекта высокой дилатансии и относительно высоких значений скорости сдвига. В условиях высокой скорости сдвига и больших расстояний между частицами поддерживается высокий уровень интенсивности всех видов взаимных перемещений частиц, что находит отражение в высоких значениях составляющих температуры зернистой среды (7) – (9).

Приведенные на рисунке 1, *в* профили свидетельствуют в целом о существенной, но неоднородной по толщине слоя зависимости температуры от угла наклона шероховатого ската. В центральной части потока температура зернистой среды изменяется в небольшой степени и остается на низком уровне, что, очевидно, связано с отсутствием зависимости скорости сдвига от угла наклона ската при относительно малом приросте доли пустот в этой части потока. Важно отметить, что с увеличением интенсивности сдвигового воздействия температура в верхней части потока повышается, достигая максимальных значений при относительном угле ската 1,09, и уменьшается при дальнейшем его увеличении. Изложенное свидетельствует об ограниченных возможностях интенсификации взаимодействия частиц в быстром гравитационном потоке за счет повышения интенсивности гравитационного воздействия и указывает на целесообразность поиска технических решений по генерированию квазитепловых эффектов в верхней и центральной частях гравитационного потока.

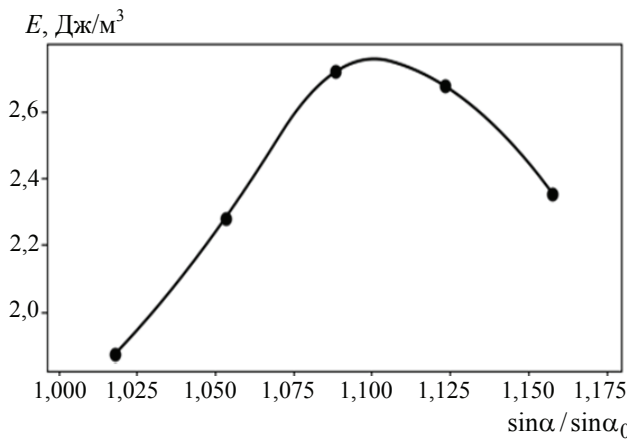
Правомерность такого вывода подтверждается результатами исследования средних интегральных по толщине слоя значений температуры зернистой среды (6) и ее составляющих (7) – (9) в зависимости от относительного угла ската, которые определяются с использованием следующей зависимости:

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ji} u_i \Delta y_i (1 - \varepsilon_i)}{\sum_{i=1}^n u_i \Delta y_i (1 - \varepsilon_i)}, \quad (11)$$

где  $i = 1, \dots, n$  – номер элементарного подслоя в потоке;  $u_i$  – средняя скорость потока в  $i$ -м подслое;  $\Delta y_i$  – толщина  $i$ -го подслоя;  $\varepsilon_i$  – средняя доля пустот  $i$ -го подслоя;  $E_{ji}$  – среднее значение температуры  $E$  или одной из ее составляющих  $E_{sh}, E_{fl}, E_{tr}$  в  $i$ -м подслое.

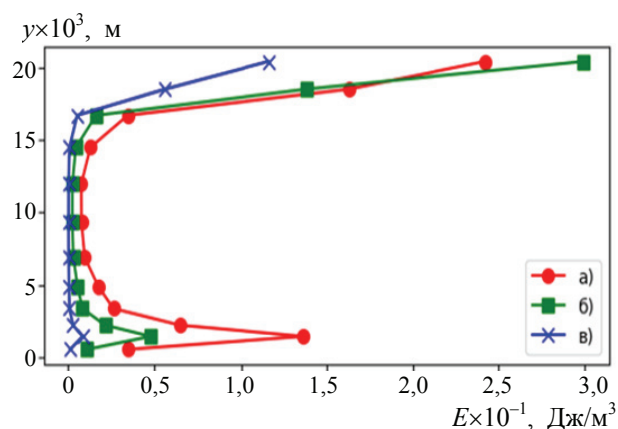
На рисунке 2 представлена зависимость средних интегральных значений температуры потока зернистой среды от интенсивности гравитационного воздействия – величины скатывающей силы, которая выражается в виде относительного значения угла ( $\sin\alpha/\sin\alpha_0$ ) ската. Приведенная зависимость свидетельствует о том, что диапазон интенсивности гравитационного воздействия, с повышением которой обеспечивается увеличение температуры зернистой среды, соответствует углам ската, удовлетворяющим условию  $\sin\alpha/\sin\alpha_0 \leq 1,09$ . С учетом особенностей эволюции профилей скорости (см. рис. 1, а) можно утверждать, что ограниченные возможности повышения температуры зернистой среды в гравитационном потоке за счет повышения интенсивности гравитационного воздействия связаны с увеличением скорости сдвига только в небольшой приграничной зоне у основания потока. В остальной части потока увеличения скорости сдвига не наблюдается.

Область потока, расположенная в верхней части слоя характеризуется структурно-кинематическими параметрами (см. рис. 1, а, б), которые способствуют интенсивному протеканию квазидиффузионных процессов сепарации и перемешивания частиц. Высокие значения доли пустот и относительной сдвиговой скорости между частицами в этой части потока создают условия для их интенсивного квазидиффузионного перемещения с большой длиной свободного пробега. Это подтверждается результатами исследования [16] профилей составляющих температуры зернистой среды (7) – (9), которые представлены на рис. 3. Согласно приведенным данным, в нижней и средней частях потока в структуре температуры доминирует составляющая, обусловленная относительным сдвиговым перемещением частиц (8). В верхней же части потока существенно повышается значимость составляющих температуры  $E_{fl}$  и  $E_{tr}$ , связанных с квазидиффузионным характером взаимных перемещений частиц. Значения температуры, обусловленные флуктуациями (7) и поперечным массопереносом (9) частиц, в верхней части потока приобретают значения, сравнимые с температурой, обусловленной их относительным сдвиговым перемещением (8).



**Рис. 2. Среднее интегральное значение температуры зернистой среды в быстром гравитационном потоке стеклянного бисера в зависимости от относительного значения угла наклона шероховатого ската**



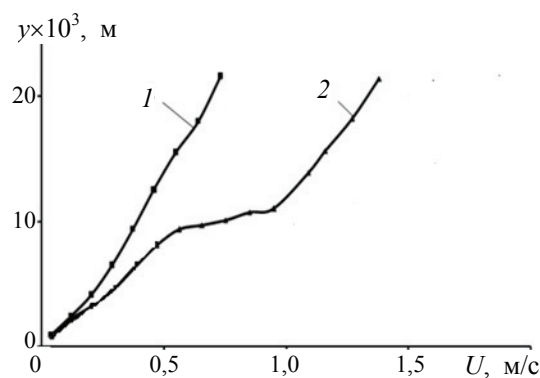


**Рис. 3. Профили локальных значений температуры зернистой среды, обусловленных сдвиговым перемещением (а), флуктуацией (б) и поперечным массопереносом (в) частиц, в быстром гравитационном потоке стеклянного бисера при относительном значении угла наклона шероховатого ската  $\sin \alpha / \sin \alpha_0 = 1,09$**

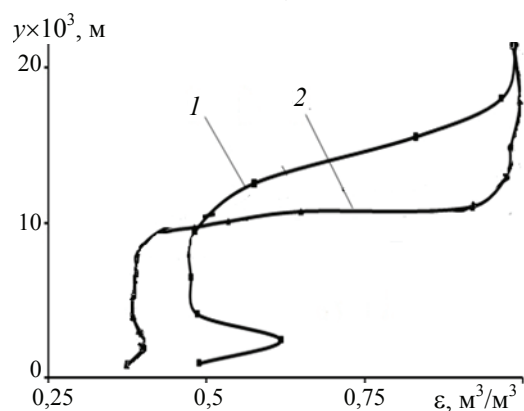
В связи с тем что квазидиффузионные эффекты взаимодействия частиц в быстром гравитационном потоке имеют технологическое применение [13], актуальной задачей является их интенсификация, которая достигается путем повышения температуры зернистой среды в соответствующей части потока. Согласно результатам проведенного анализа квазитепловых эффектов в быстром гравитационном потоке (см. рис. 1, в), для интенсификации диффузионных эффектов необходимо повышение температуры в верхней части потока. Однако повышение температуры в этой части потока за счет увеличения интенсивности гравитационного сдвига ограничено значением относительного угла ската  $\sin \alpha / \sin \alpha_0 = 1,09$ . Вследствие этого, для повышения температуры зернистой среды требуется размещение в верхней части слоя источников квазитеплого потока.

Одним из эффективных способов решения такого рода задачи является воздействие продольными импульсами на частицы открытой поверхности гравитационного потока в направлении ската [17]. Происходящая при этом интенсификация сдвиговых деформаций в верхней части потока приводит к проявлению дополнительных квазитепловых эффектов, способствующих интенсификации квазидиффузионного взаимодействия частиц. Это подтверждается результатами исследования эффективности технического решения, реализующий указанный способ путем генерирования импульсов шероховатой лентой конвейера [17], находящейся в контакте с частицами открытой поверхности потока. На рисунке 4 приведено сравнение профилей скорости и доли пустот в быстрых гравитационных потоках смеси однородных по размеру гранул (фракция +3,6...3,75 мм) бисера и силикагеля при воздействии и в отсутствии импульсного воздействия на частицы открытой поверхности потока.

Сравнение профилей скорости (см. рис. 4, а) свидетельствует о существенном возрастании скорости сдвига в верхней части потока, которое в соответствии с выражениями (6) – (9) сопровождается увеличением температуры зернистой среды и всех ее составляющих. Вследствие увеличения температуры, согласно уравнению состояния зернистой среды (1), происходит дилатансия потока при соответствующем увеличении доли пустот в верхней его части (см. рис. 4, б). Квазитепловой поток импульсов приводит к формированию уплотненной области гравитационного потока вблизи его основания. Область отделена от разреженной части потока зоной интенсивного сдвига, которая располагается на границе между разреженной и уплотненной частями гравитационного потока. Важно отметить, что использование дополнительных продольных импульсов обеспечивает повышение скорости сдвига во всем объеме потока.



а)



б)

**Рис. 4. Профили скорости (а) и объемной доли пустот (б) в гравитационных потоках смеси монодисперсных частиц (+3,6...3,75 мм) бисера и силикагеля без воздействия 1 и при воздействии 2 продольных импульсов (скорость ленточного конвейера 1,5 м/с) на частицы открытой поверхности потока**

### Заключение

Таким образом, исследование профилей температуры зернистой среды, как кинетической энергии различных форм взаимных перемещений частиц, в ее быстром гравитационном потоке свидетельствует о доминировании в большей части потока составляющей температуры, обусловленной относительной сдвиговой скоростью. Интенсивность квазидиффузионного взаимодействия частиц определяют составляющие температуры, обусловленные хаотическими флуктуациями и поперечным массопереносом. Увеличение названных составляющих температуры с целью интенсификации квазидиффузионного взаимодействия частиц путем варьирования углом ската возможно только в ограниченном диапазоне его изменения. Одним из эффективных вариантов интенсификации может быть размещение в гравитационном потоке источника квазитеплового потока, генерирующего дополнительные продольные импульсы.

### Список литературы

1. Nagel, S. R. Experimental Soft-Matter Science / S. R. Nagel // Review of Modern Physics. – 2017. – Vol. 89, No. 2. – P. 025002. doi: 10.1103/Revmodphys.89.025002

2. Forterre, Y. Flows of Dense Granular Media / Y. Forterre, O. Pouliquen // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2008. – Vol. 40, No. 1. – P. 1 – 24. doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142
3. Brennen, C. E. Fundamentals of Multiphase Flows / C. E. Brennen. – NY: Cambridge University Press, 2005. – 410 p. doi:10.1017/CBO9780511807169
4. Windows-Yule, C. R. K. Numerical modeling of granular flows: a reality check / C. R. K. Windows-Yule, D. R. Tunuguntla, D. J. Parker // *Computational Particle Mechanics*. – 2015. – Vol. 3, No. 3. – P. 311 – 332. doi:10.1007/s40571-015-0083-2
5. Hill, K. M. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // *KONA Powder and Particle Journal*. – 2016. – Vol. 33, No. 33. – P. 150 – 168. doi: 10.14356/kona.2016022
6. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows / B. Domnik, S. P. Pudasaini, R. Katzenbach, S. A. Miller // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2013. – Vol. 201. – P. 56 – 68. doi: 10.1016/j.jnnfm.2013.07.005
7. Jesuthasan, N. Use of Particle Tracking Velocimetry for Measurements of Granular Flows: Review and Application – Particle Tracking Velocimetry for Granular Flow Measurements / N. Jesuthasan, B. R. Baliga, S. B. Savage // *KONA Powder and Particle Journal*. – 2006. – Vol. 24. – P. 15 – 26. doi: 10.14356/kona.2006006
8. Jenkins, J. T. Kinetic theory applied to inclined flows / J. T. Jenkins, D. Berzi // *Granular Matter*. – 2012. – Vol. 14, No. 2. – P. 79 – 84. doi: 10.1007/s10035-011-0308-x
9. Niu, W. Effect of Vibration on Characteristics of granular inclined Chute Flow Under Low-gravity / W. Niu, H. Zheng // *Microgravity Science and Technology*. – 2023. – Vol. 35, No. 1. – Art. 2. doi: 10.1007/s12217-022-10029-6
10. Долгунин, В. Н. Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, М. А. Туев // *Успехи физических наук*. – 2020. – Т. 190, № 6. – С. 585 – 604. doi: 10.3367/UFNr.2020.01.038729
11. Brilliantov, N. V. Kinetic Theory of Granular Gases / N. V. Brilliantov, T. Poschel. – Oxford University Press, 2004. – 329 p.
12. Kudrolli, A. Size separation in vibrated granular matter / A. Kudrolli // *Reports on Progress in Physics*. – 2004. – Vol. 67, No. 3. – P. 209 – 247. doi: 10.1088/0034-4885/67/3/R01
13. К решению проблемы сепарации смеси различных по форме полидисперсных частиц / А. Н. Куди, Н. А. Федосов, В. В. Сергеев, В. Н. Долгунин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 271 – 280. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.271-280
14. Dolgunin, V. N. Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, V. Ya. Borshchev, P. A. Ivanov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2025. – Vol. 39, No. 5. – P. 548 – 554. doi: 10.1007/s11236-005-0115-3
15. Dolgunin, V. N. Segregation kinetics of particles with different roughness and elasticity under a rapid gravity flow of a granular medium / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2009. – Vol. 43, No. 2. – P. 187 – 195. doi: 10.1134/S0040579509020092
16. Dolgunin, V. N. Quasithermal Effects During Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, S. A. Akopyan // *Advanced Materials and Technologies*. – 2020. – No. 3(19). – P. 47 – 55. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.047-055
17. Долгунин, В. Н. Квазидиффузионная сепарация при активировании сдвиговых деформаций в быстром гравитационном потоке зернистого материала / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. Н. Куди // *Инженерно-физический журнал*. – 2024. – Т. 97, № 5. – С. 1201 – 1210.

## Quasithermal Fluxes and Mass Transfer of Particles in Shear Flow of Granular Media

V. N. Dolgunin✉, A. A. Zhilo, A. N. Kudi, V. A. Pronin, A. G. Tarakanov

*Department of Technology and Equipment for Food and Chemical Production, dolgunin-vn@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** gravity flow; void fraction; granular medium; quasi-diffusion; temperature of the granular medium; equation of state.

**Abstract:** The paper presents the results of an experimental and analytical study of the structural and kinematic parameters of the shear gravity flow of cohesionless inelastic spherical particles of granular materials in a state of high dilatancy. The equation of state, which establishes the relationship between the structural and kinematic parameters, is used to analyze the significance of various forms of mutual particle displacements (shear displacement, chaotic fluctuations, and transverse mass transfer) in shaping the structure of a fast gravity flow of a granular medium. It is established that, over the greater part of the flow on a rough chute, the dominant role belongs to the shear displacement of particles. Chaotic fluctuations and transverse mass transfer, which determine the intensity of quasi-diffusion effects of particle interaction, acquire primary significance in the region of flow with high dilatancy in the upper part of the layer. Intensification of quasi-diffusion effects by increasing the intensity of gravity shear is possible by varying the chute angle over a narrow range. A conclusion has been reached regarding the feasibility of intensifying the quasi-diffusion effects of particle interactions under the influence of a quasi-thermal flow generated by longitudinal pulses distributed over the open surface of the gravity flow. An analysis of a method for ensuring conditions for quasi-diffusion interactions between particles under the combined influence of gravity shear and tangential pulses is performed.

### References

1. Nagel S.R. Experimental soft-matter science, *Review of Modern Physics*, 2017, vol. 89, no. 2, pp. 025002. doi: 10.1103/Revmodphys.89.025002
2. Forterre Y., Pouliquen O. Flows of Dense Granular Media, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 40, no. 1, pp. 1-24. doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142
3. Brennen C.E. *Fundamentals of Multiphase Flows*, NY: Cambridge University Press, 2005, 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169
4. Windows-Yule C.R.K., Tunuguntla D.R., Parker D.J. Numerical modeling of granular flows: a reality check, *Computational Particle Mechanics*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 311-332. doi:10.1007/s40571-015-0083-2
5. Hill K.M., Fan Y. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures, *KONA Powder and Particle Journal*, 2016, vol. 33, no. 33, pp. 150-168. doi: 10.14356/kona.2016022
6. Domnik B., Pudasaini S.P., Katzenbach R., Miller S.A. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, vol. 201, pp. 56-68. doi: 10.1016/j.jnnfm.2013.07.005
7. Jesuthasan N., Baliga B.R., Savage S.B. Use of Particle Tracking Velocimetry for Measurements of Granular Flows: Review and Application – Particle Tracking

Velocimetry for Granular Flow Measurements, *KONA Powder and Particle Journal*, 2006, vol. 24, pp. 15-26. doi: 10.14356/kona.2006006

8. Jenkins J.T., Berzi D. Kinetic theory applied to inclined flows, *Granular Matter*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 79-84. doi: 10.1007/s10035-011-0308-x

9. Niu W., Zheng H. Effect of Vibration on Characteristics of granular inclined Chute Flow Under Low-gravity, *Microgravity Science and Technology*, 2023, vol. 35, no. 1, art. 2. doi: 10.1007/s12217-022-10029-6

10. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tuev M.A. [Mechanisms and kinetics of gravitational separation of granulated materials], *Uspehi fizičeskikh nauk* [Successes of Physical Sciences], 2020, vol. 190, no. 6, pp. 585-604. doi: 10.3367/UFNr.2020.01.038729 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Brilliantov N.V., Poschel T. *Kinetic Theory of Granular Gases*, Oxford University Press, 2004, 329 p.

12. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter, *Reports on Progress in Physics*, 2004, vol. 67, no. 3, pp. 209-247. doi: 10.1088/0034-4885/67/3/R01

13. Kudi A.N., Fedosov N.A., Sergeev V.V., Dolgunin V.N. [Towards a solution to the problem of separating a mixture of polydisperse particles of different shapes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 271-280. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.271-280 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya., Ivanov P.A. Rapid Gravity Flow of a Granular Medium, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2025, vol. 39, no. 5, pp. 548-554. doi: 10.1007/s11236-005-0115-3

15. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. Segregation kinetics of particles with different roughness and elasticity under a rapid gravity flow of a granular medium, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2009, vol. 43, no. 2, pp. 187-195. doi: 10.1134/S0040579509020092

16. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Akopyan S.A. Quasithermal Effects During Rapid Gravity Flow of a Granular Medium, *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3(19), pp. 47-55. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.047-055

17. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Kudi K.A. [Quasidiffusion separation during activation of shear deformations in a fast gravitational flow of granular material], *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Engineering Physics Journal], – 2024, vol. 97, no. 5, pp. 1201-1210. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### Quasi-thermale Flüsse und Massentransfer von Partikeln in der Scherstraffung von körnigen Medien

**Zusammenfassung:** Der Artikel präsentiert die Ergebnisse experimenteller und analytischer Untersuchungen der Struktur- und Kinematikparameter der Scherströmung nicht-kohäsiver, inelastischer sphärischer Partikel granularer Materialien im Zustand hoher Dilatanz. Mithilfe der Zustandsgleichung, die den Zusammenhang zwischen Struktur- und Kinematikparametern herstellt, ist die Bedeutung verschiedener Formen der gegenseitigen Partikelverschiebung (Scherverschiebung, chaotische Fluktuationen und transversaler Stofftransport) für die Struktur der schnellen Gravitationsströmung in einem granularen Medium analysiert. Es ist festgestellt, dass die Scherverschiebung der Partikel bei einem Großteil der Strömung an einem rauen Hang die dominierende Rolle spielt. Chaotische Fluktuationen und transversaler Stofftransport, die die Intensität der Quasi-Diffusionseffekte der Partikelwechselwirkung bestimmen, gewinnen im Strömungsbereich mit hoher Dilatanz im oberen Teil der Schicht an Bedeutung. Eine Verstärkung der Quasi-Diffusionseffekte durch Erhöhung der Intensität der Gravitationsscherung ist durch Variation des Hangwinkels in einem engen Bereich

möglich. Es ist eine Schlussfolgerung hinsichtlich der Zweckmäßigkeit der Verstärkung quasi-diffusionsbedingter Partikelwechselwirkungen unter dem Einfluss der quasi-thermischen Strömung gezogen, die durch longitudinale Pulse erzeugt wird, welche über die exponierte Oberfläche einer Materialschicht an einem Hang verteilt sind. Es ist eine Variante analysiert, die Bedingungen für quasi-diffusionsbedingte Wechselwirkungen zwischen Partikeln unter der kombinierten Wirkung von Gravitationsscherung und tangentialen Pulsen schafft.

---

### **Flux quasi thermiques et transfert de masse des particules lors du cisaillement des milieux granulaires**

**Résumé:** Sont présentés les résultats des études expérimentales et analytiques sur les paramètres structurels et cinématiques du flux de gravitation par cisaillement des particules sphériques inélastiques disjointes des matériaux granulaires dans un état de dilatation élevée. A la base de l'équation d'état établissant la relation entre les paramètres structurels et cinématiques, est analysée l'importance des différentes formes de mouvements réciproques des particules (déplacement de cisaillement, fluctuations chaotiques et masse transversale) dans la formation de la structure du flux gravitationnel rapide du milieu granulaire. Est établi que dans une grande partie du flux sur une pente rugueuse le mouvement de cisaillement des particules joue un rôle dominant. Les fluctuations chaotiques et le transfert de masse transversal, qui déterminent l'intensité des effets quasi-diffus de l'interaction des particules, prennent une importance primordiale dans le domaine du flux avec une dilatation élevée au sommet de la couche. Il est possible d'intensifier les effets quasi-diffusifs en augmentant l'intensité du cisaillement gravitationnel en faisant varier l'angle de la pente dans une plage étroite. Est faite la conclusion sur l'intensification des effets quasi-diffusionnels de l'interaction des particules sous l'action d'un flux quasi-thermique généré par des impulsions longitudinales réparties sur la surface ouverte de la couche de matériau sur la pente. Est analysée la possibilité de fournir des conditions pour l'interaction quasi-diffuse des particules sous l'effet complexe du cisaillement gravitationnel et des impulsions tangentielles.

---

**Авторы:** *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Жило Андрей Андреевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Куди Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Тараканов Александр Геннадьевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.



## ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА В СУСПЕНЗИИ

П. А. Галкин<sup>1</sup>✉, Ю. Т. Селиванов<sup>1</sup>, Ж. А. Зарандия<sup>2</sup>,  
С. И. Лазарев<sup>1</sup>, М. С. Абрамов<sup>1</sup>, П. М. Малин<sup>1</sup>

Кафедры: «Механика и инженерная графика» (1); «Электроэнергетика» (2),  
paragam@inbox.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** полиметилметакрилат; полимер-мономерные частицы; реакционная система; реактор-полимеризатор; стабилизатор эмульсии.

**Аннотация:** Дано обоснование целесообразности разделения процесса суспензионной полимеризации метилметакрилата на стадии и проведения его по непрерывной технологии. Изучена вторая стадия процесса – доведение реакционной системы до состояния, когда плотность углеводородной фазы (УФ) меньше плотности водной фазы. В лабораторных условиях проведены исследования устойчивости системы от ее физико-химических свойств. Получены зависимости «времени жизни» частиц УФ от их диаметра, угла наклона лопастей перемешивающего устройства, степени конверсии, концентрации стабилизатора, то есть найдены оптимальные режимы для данной стадии полимеризации. Для проведения первой и второй стадии процесса предложена запатентованная конструкция реактора-полимеризатора.

### Обозначения

$A$ – сила Архимеда, Н;	$t$ – температура реакционной системы, °С;
$C_{\text{ст}}$ – концентрация стабилизатора, %;	$v$ – скорость движения частиц углеводородной фазы, м/с;
$C_{\text{к}}$ – степень конверсии форполимера, %;	$\alpha$ – угол наклона лопасти перемешивающего устройства, град;
$d_{\text{к}}$ – диаметр частицы углеводородной фазы, мм;	$\rho_{\text{в}}, \rho_{\text{м}}, \rho_{\text{пмч}}$ – плотности водной фазы, мономера и полимер-мономерных частиц соответственно, кг/м <sup>3</sup> ;
$d_0$ – диаметр отверстий диспергирующего устройства, мм;	$\tau_{\text{ж}}$ – время жизни частиц углеводородной фазы, с.
$F_{\text{сс}}, F_{\text{тр}}, G$ – силы сопротивления среды, трения и тяжести соответственно, Н;	
$N$ – нормальная реакция, Н;	

### Введение

Промышленное производство суспензионного полиметилметакрилата (ПММА) литьевых марок осуществляется по схеме периодического процесса [1], со всеми присущими ему недостатками: низкой производительностью оборудования, значительными потерями в виде трудноутилизуемых отходов, разбросом готового продукта по гранулометрическому составу, что затрудняет и удорожает операцию отмывки готового полимера от стабилизатора [2, 3]. Указанные недостатки можно объяснить, прежде всего, единством места протекания всех стадий полимеризации и невозможностью создания оптимальных условий для каждой



стадии. Устранение данных недостатков возможно при переводе процесса с периодического на непрерывный.

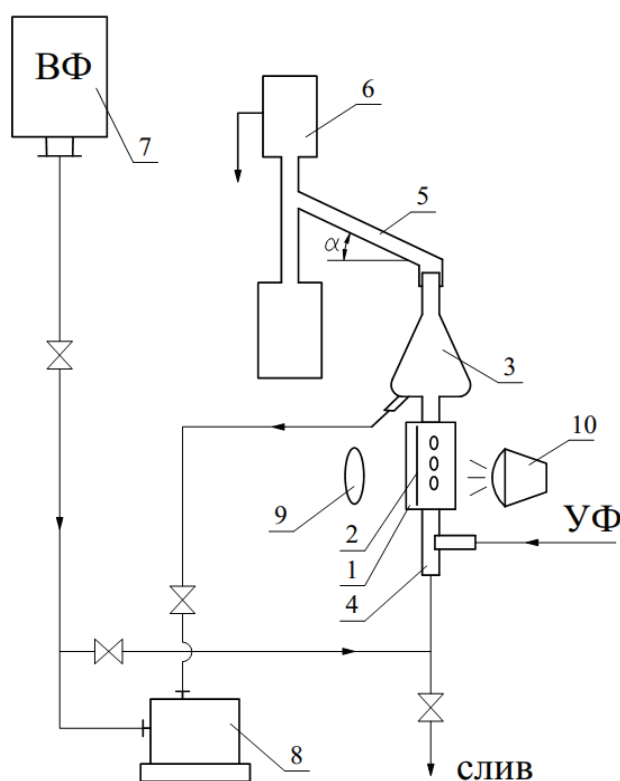
В процессе суспензионной полимеризации двухфазная реакционная система проявляет склонность к разделению на водную (**ВФ**) и углеводородную (**УФ**) фазы, что представляет основную трудность при проведении процесса по непрерывной технологии [4]. Устойчивость системы обеспечивается введением в водную фазу стабилизатора (поверхностно-активного вещества), создающего на поверхности полимеризующихся частиц защитную пленку, а также постоянным перемешиванием. Процесс суспензионной полимеризации можно условно разделить на три стадии: 1 – образование исходной монодисперсной эмульсии с заданным размером капель углеводородной фазы; 2 – полимеризация до степени конверсии, при которой плотность углеводородной фазы становится больше плотности водной фазы и полимер-мономерные частицы (**ПМЧ**) начинают осаждаться; 3 – полимеризация до окончания процесса. Все три стадии целесообразно разделить по месту их проведения.

Наименьшую устойчивость реакционная система имеет на второй стадии процесса, так как набирающие плотность ПМЧ при взаимных контактах могут сливаться друг с другом, разрушая защитную пленку стабилизатора. Поэтому важное значение имеет создание такой гидродинамической обстановки в аппарате, которая обеспечивала бы перемещение частиц УФ без значительных взаимодействий, разрушающих пленку поверхностно-активного вещества. С другой стороны, чрезмерно малое механическое воздействие на систему приводит к группированию ПМЧ в верхней части аппарата, сливанию их и окончательному разделению фаз. Следует отметить, что на устойчивость системы также отрицательно сказывается контакт частиц УФ с газовой фазой на поверхности ВФ в верхней части аппарата, который приводит к их разрушению и образованию углеводородной пленки, которая увлекает все больше ПМЧ и в конечном итоге приводит к разделению фаз и образованию агломератов.

#### **Поиск путей оптимизации физико-химических и технологических параметров процесса**

Наиболее важную роль в создании необходимого гидродинамического режима играет конструкция перемешивающего устройства и подбор режима его работы. Для выработки рекомендаций по выбору типа, а также геометрических и технологических параметров перемешивающего устройства, проведены исследования по выявлению факторов, наиболее сильно влияющих на устойчивость реакционной системы [5]. Достаточно полно агрегативная устойчивость дисперсной системы характеризуется «временем жизни» частиц дисперсной фазы в контакте друг с другом или с межфазной поверхностью, на которую влияет природа и концентрация стабилизатора, размер частиц, условия контакта. Для выявления этих зависимостей разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 1), позволяющая проводить исследование «времени жизни» дуплетов, триплетов и других первичных частиц эмульсии мономера и форполимера метилметакрилата в водном растворе защитного коллоида с использованием наклонного элемента, моделирующего условия взаимодействия частиц при их движении по лопастям перемешивающего устройства. Изменение угла наклона элемента позволяет выявить влияние этого фактора на устойчивость системы для дальнейшей разработки конструкции перемешивающего устройства.

Установка работает следующим образом. Углеводородная фаза дозирующим насосом подается в диспергирующее устройство 4, при истечении из которого в спутном потоке ВФ происходит распад струи и образование капель дисперсной фазы.



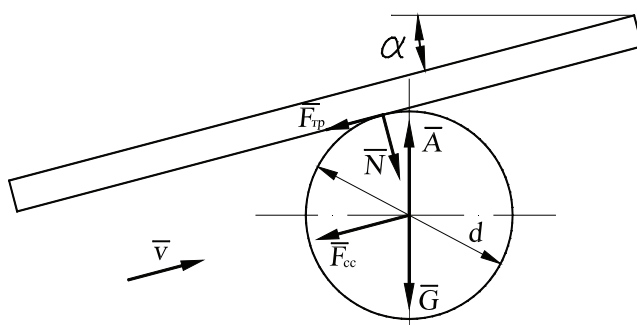
**Рис. 1. Схема лабораторной установки:**

1 – камера; 2 – калибровочный стержень; 3 – отстойник-разделитель;  
4 – диспергирующее устройство; 5 – наклонный элемент; 6 – сборник;  
7 – расходная емкость ВФ; 8 – насос подачи ВФ; 9 – фотокамера; 10 – источник света

Размер капель регулируется скоростью спутного потока ВФ, скоростью истечения УФ, диаметром отверстия диспергирующего устройства, вязкостью фаз реакционной системы. Скорости подачи обеих фаз регулируются дозирующими насосами.

Сформированные частицы УФ поступают в камеру с плоскими стенками 1, где фотографируются камерой 9 в проходящем свете. Размер частиц определяется из анализа фотоснимков, для чего в плоскости движения установлен калибровочный стержень 2 известного диаметра. Далее поток направляется в отстойник 3, в нижней части которого происходит отбор ВФ, к дозирующему насосу 8. Частицы УФ поднимаются в наклонный элемент 5 уже в неподвижной сплошной фазе. Проводится измерение «времени жизни»  $\tau_{\text{ж}}$  капель и скорости их движения  $v$ , после чего УФ попадает в сборник 6. Все элементы установки, контактирующие с УФ, выполнены из термостойкого стекла.

Движение частиц УФ в наклонном элементе происходит под действием силы Архимеда при противодействии силы трения о плоскость и силы сопротивления водной среды (рис 2). При движении материальной частицы в жидкой среде возникают гидродинамические сопротивления, величины которых зависят в первую очередь от режима движения и формы обтекаемых частиц. Особенностью данного процесса является то, что ПМЧ всплывают не свободно, их движение ограничено сверху наклонной плоскостью. Движение при очень малых скоростях и, следовательно, малых значениях критерия Рейнольдса ( $Re < 1$ ) называется в гидромеханике ползущим. При этом вязкие силы в потоке преобладают над инерционными.



**Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу при установившемся движении вверх вдоль наклонной плоскости**

Рассмотрим установившееся движение частицы вверх вдоль наклонной плоскости (см. рис. 2) под действием следующих сил: силы тяжести  $G$ , силы Архимеда  $A$ , силы сопротивления среды (водной фазы)  $F_{cc}$ , нормальной реакции плоскости  $N$ . Силой трения о плоскость  $F_{тр}$  в данном случае можно пренебречь, так как она незначительна.

Если частица движется в жидкости вдоль наклонного элемента с некоторой скоростью  $v$ , то при достаточно малых значениях скорости сила сопротивления оказывается меньше, чем движущая сила. В этом случае твердая частица будет двигаться ускоренно. При увеличении скорости частицы также будет увеличиваться сила сопротивления, и при некотором значении скорости  $v$  сила сопротивления уравнивает движущую силу. При этом условии частица будет двигаться с постоянной скоростью, которая называется установившейся. При этом векторная сумма сил, действующих на частицу, будет равна нулю, и можно рассматривать ее как находящуюся в равновесии.

### Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментов представлены в ряде зависимостей. На рисунке 3 отображена зависимость «времени жизни» частиц от угла наклона элемента при постоянстве прочих параметров. В качестве стабилизатора использовался нейтрализованный сополимер метилметакрилата и метакриловой кислоты, концентрацией стабилизатора  $C_{ст} = 0,15\%$  к воде. Эксперименты проведены на мономере и форполимере различной степени конверсии. Как видно из графиков, зависимости имеют довольно четко выраженный максимум, то есть можно сказать, что диапазон угла наклона элемента, а в дальнейшем и лопасти перемешивающего устройства,  $\alpha = 10^\circ \dots 20^\circ$  является оптимальным с точки зрения деформации частиц.

При меньших углах наклона более значительна деформация частицы под действием силы Архимеда, а следовательно, больше растяжение адсорбционной оболочки стабилизатора. При больших углах наклона больше вероятность качения, а не скольжения частицы по плоскости, что может привести к нарушению слоя защитного коллоида.

На рисунке 4 представлена зависимость «времени жизни» частиц УФ от их диаметра  $d_k$  при  $\alpha = 15^\circ$ ;  $C_{ст} = 0,15\%$ ;  $t = 20^\circ\text{C}$ . Как видно, устойчивость системы снижается с ростом размера частиц ввиду увеличения их деформирования. При распаде струи капля УФ принимает сферическую форму тем быстрее, чем меньше ее диаметр. С ростом  $d_k$ , после отрыва от струи УФ капля совершает колебания, принимая форму эллипсоида то с большей вертикальной осью, то с горизонтальной. Это способствует быстрому насыщению адсорбционной оболочки защитного коллоида, поэтому последующая деформация капли на наклонной

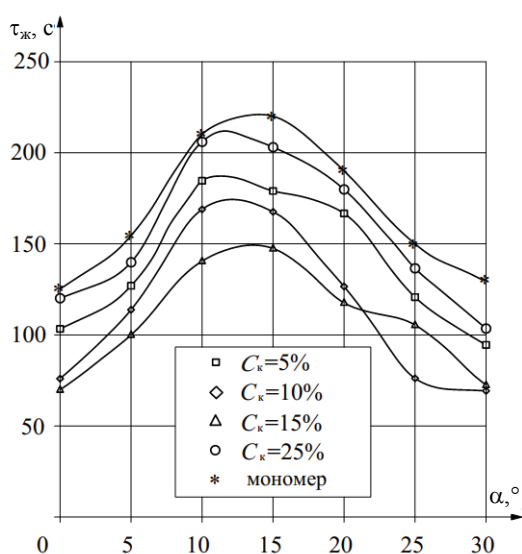


Рис. 3. Зависимость  $\tau_{ж} = f(\alpha)$

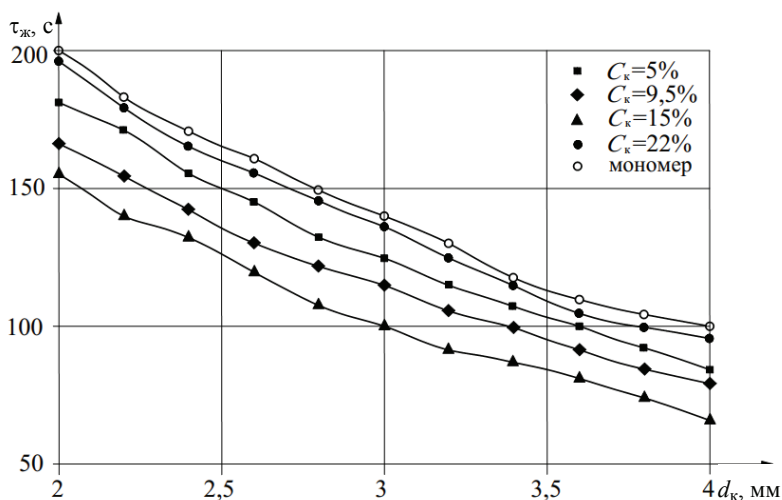


Рис. 4. Зависимость  $\tau_{ж} = f(d_k)$

плоскости уже не ослабляет защитные свойства [6]. Чем выше степень конверсии, тем медленнее происходят колебания формы капли, тем позднее наступает равновесие в насыщении адсорбционного слоя.

Рост «времени жизни» ПМЧ наблюдается при степени конверсии форполимера  $C_k = 15 \dots 20 \%$  (рис. 5). По-видимому, до 15 % степени конверсии капли сохраняют медленную подвижность колебаний формы, что защищает насыщение адсорбционной оболочки. Капли с более высокой степенью конверсии при нахождении на плоскости не успевают изменить форму, благодаря высокой вязкости и межфазному натяжению, поэтому  $\tau_{ж}$  возрастает.

Наиболее эффективной является концентрация стабилизатора  $C_{ст}$ , при которой наблюдается рост «времени жизни» (рис. 6). В данном диапазоне концентраций обеспечивается насыщение оболочки защитного коллоида.

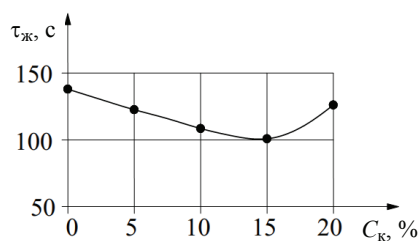


Рис. 5. Зависимость  $\tau_{ж} = f(C_k)$

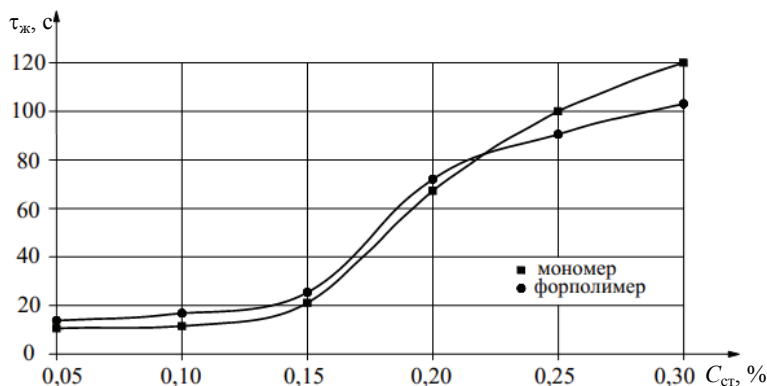
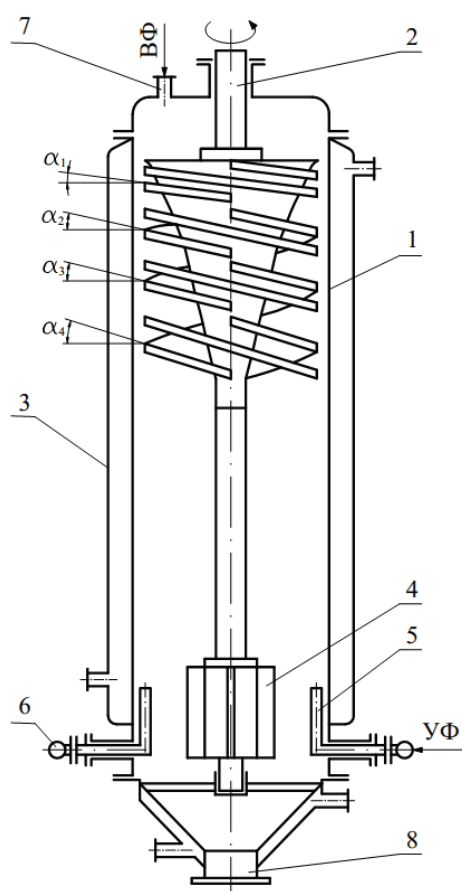


Рис. 6. Зависимость  $\tau_{ж} = f(C_{ст})$

Отставание кривой «времени жизни» ПМЧ форполимера можно объяснить замедлением скорости перемещения и началом взаимного контакта ПМЧ с ростом вязкости ВФ и влиянием разности плотностей водной и углеводородной фаз:  $\Delta\rho_1 = \rho_v - \rho_m$  и  $\Delta\rho_2 = \rho_v - \rho_{ПМЧ}$ ,  $\Delta\rho_1 > \Delta\rho_2$ .

#### Рекомендации по практическому использованию полученных результатов

Результаты экспериментов могут быть использованы при проектировании реакционной аппаратуры непрерывного действия. Для проведения первой и второй стадий процесса разработана и запатентована конструкция реактора-полимеризатора колонного типа с перемешивающим устройством, позволяющим обеспечить равномерное распределение УФ в верхней части аппарата без образования агломератов (рис. 7) [7]. Перемешивающее устройство 2 выполнено из двух секций. Верхняя представляет собой параболоид вращения с размерами, приближающимися к размерам центральной воронки, снабжена перекрывающимися друг друга наклонными лопастями, имитирующими винтовую поверхность, состоящую из параллельных ярусов. Углы наклона ярусов лопастей увеличиваются сверху вниз:  $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4$  в диапазоне  $10^\circ \dots 20^\circ$ . Указанные значения углов наклона лопастей приняты по результатам экспериментов, представленным на рис. 3, и являются оптимальными в контексте повышения устойчивости реакционной системы. Нижняя секция – лопастная мешалка 4 снабжена вертикальными лопастями и служит для своевременной выгрузки частиц и создания потока, необходимого для диспергирования УФ. Последнее осуществляется в нижней части аппарата диспергирующим устройством струйного типа 5 через систему перфорированных трубок каплевидного сечения, объединенных коллектором снаружи аппарата. Корпус 1 снабжен термостатирующей рубашкой. Штуцеры 7 и 8 служат для ввода ВФ и вывода готового продукта.



**Рис. 7. Схема реактора-полимеризатора:**

1 – корпус; 2 – перемешивающее устройство; 3 – рубашка;  
4 – нижний ярус перемешивающего устройства; 5 – диспергирующее устройство;  
6 – коллектор; 7 – штуцер ввода ВФ; 8 – нижний штуцер

Реактор-полимеризатор работает следующим образом: ВФ подводится в аппарат через штуцер 7; УФ подается дозировочным насосом через диспергирующее устройство. Диаметр отверстий диспергирующего устройства  $d_0 = 0,5 \dots 0,8$  мм, шаг равен 8 мм. Вследствие того, что в начале процесса плотность УФ меньше плотности ВФ, частицы УФ стремятся всплыть в верхнюю часть аппарата, где они перемешиваются верхней секцией мешалки 3, работающей в ламинарном режиме, при этом частицы двигаются по поверхности лопастей, переходя с одной на другую. Причем более легкие частицы перемещаются ярусами мешалки с меньшими углами наклона лопастей, а более тяжелые – ярусами мешалки с большими углами наклона лопастей, что обеспечивает относительно равномерное распределение УФ по высоте слоя. После достижения плотности УФ, превышающей плотность ВФ, полимеризующиеся частицы осаждаются в нижнюю часть реактора, где они перемешиваются нижним ярусом мешалки 4, который также служит для создания потока среды при диспергировании УФ, и выводятся из аппарата через нижний штуцер 8.

## Заключение

Представленная конструкция реактора-полимеризатора может быть использована для производства полистирола, ПММА и их сополимеров непрерывным методом суспензионной полимеризации и принята к применению при реконструкции реакционного оборудования на АО «Пигмент» (Тамбов). При выборе технологических параметров проведения процесса полимеризации метилметакрилата в соответствии с результатами экспериментов, представленных на рис. 4 – 6 можно рекомендовать следующее. Диаметр капель УФ исходной эмульсии  $d_k$  следует принимать около 3 мм, а степень их конверсии  $C_k = 20\%$ , что положительно сказывается на устойчивости реакционной системы со одной стороны, а также уменьшает необходимое время протекания процесса в двухфазной системе, так как начало реакции полимеризации протекает в массе мономера, что технически проще реализовать. Следовательно, концентрацию стабилизатора  $C_{ст}$  необходимо выбирать в диапазоне  $0,2 \dots 0,25\%$  (см. рис. 6).

## Список литературы

1. Николаев, А. Ф. Технология пластических масс / А. Ф. Николаев. – Ленинград : Химия, 1977. – 368 с.
2. Байзенбергер, Дж. А. Инженерные проблемы синтеза полимеров : пер. с англ / Дж. А. Байзенбергер, Д. Х. Себастиан. – Москва : Химия, 1988. – 688 с.
3. Оптимизация режимных параметров и аппаратурного оформления непрерывного процесса полимеризации метилметакрилата в суспензии / П. А. Галкин, Ю. Т. Селиванов, С. И. Лазарев, А. Ю. Селиванов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 6. – С. 3 – 8.
4. Гунин, В. А. Кинетика и аппаратурное оформление непрерывного процесса суспензионной полимеризации метилметакрилата : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Гунин Виталий Анатольевич. – Тамбов, 2000. – 16 с.
5. Зарандия, Ж. А. Устойчивость полимер-мономерных частиц, моделирование и аппаратурное оформление непрерывного процесса суспензионной полимеризации метилметакрилата : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Зарандия Жанна Александровна. – Тамбов, 2002. – 108 с.
6. Пажи, Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи. – Москва : Химия, 1984. – 254 с.
7. Патент № 2162733 Рос. Федерация, МПК B01F007/16, B01F007/18. Реактор-полимеризатор / Павлов Н. В., Гунин В. А., Галкин П. А., Зарандия Ж. А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 99112730/12 : заявл. 15.06.1999 : опубл. 10.02.2001 ; Бюл. № 4. – 3 с.

---

## Optimization of Physicochemical and Process Parameters of a Continuous Methyl Methacrylate Suspension Polymerization Process

P. A. Galkin<sup>1</sup>✉, Yu. T. Selivanov<sup>1</sup>, Zh. A. Zarandia<sup>2</sup>,  
S. I. Lazarev<sup>1</sup>, M. S. Abramov<sup>1</sup>, P. M. Malin<sup>1</sup>

Departments: Mechanics and Engineering Graphics (1);  
Electrical Power Engineering (2), paragam@inbox.ru; TSTU, Tambov, Russia

**Keywords:** polymethyl methacrylate; polymer-monomer particles; reaction system; polymerization reactor; emulsion stabilizer.



**Abstract:** This study justifies the feasibility of dividing the suspension polymerization process of methyl methacrylate into distinct stages and implementing it using continuous technology. The investigation specifically focuses on the second stage – bringing the reaction mixture to a state where the density of the organic phase (OP) is less than that of the aqueous phase (AP). Laboratory experiments examined the system's stability in relation to its physico-chemical properties. Dependencies were established for the stability duration of OP particles based on their diameter, the impeller blade inclination angle, the monomer conversion degree, and the stabilizer concentration. Consequently, optimal operating conditions for this polymerization stage were identified. A patented polymerization reactor design is proposed for conducting both the first and second stages. Furthermore, the research findings regarding the physicochemical properties of the reaction medium provide valuable data for selecting optimal process parameters.

### References

1. Nikolaev A.F. *Tekhnologiya plasticheskikh mass* [Technology of plastic masses], Leningrad: Khimiya, 1977, 368 p. (In Russ.)
2. Beisenberger J.A., Sebastian D.H. *Inzhenernye problemy sinteza polimerov* [Engineering problems of polymer synthesis], Moscow: Chemistry, 1988, 688 p. (In Russ.).
3. Galkin P.A., Selivanov Yu.T., Lazarev S.I., Selivanov A.Yu. [Optimization of operating parameters and hardware design of the continuous polymerization process of methyl methacrylate in suspension], *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2021, no. 6, pp. 3-8. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Gunin V.A. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Tambov, 2000, 16 p. (In Russ.).
5. Zarandiya J.A. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Tambov, 2002, 108 p. (In Russ.).
6. Pages D.G. *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey* [Fundamentals of the technique of spraying liquids], Moscow: Chemistry, 1984, 254 p. (In Russ.).
7. Pavlov N.V., Gunin V.A., Galkin P.A., Zarandiya J.A. *Reaktor-polimerizator* [Polymerizer reactor], Russian Federation, 2001, Pat. 2162733. (In Russ.).

---

## Optimierung physikalischer, chemischer und technologischer Parameter eines kontinuierlichen Methylmethacrylat-Suspensionspolymerisationsprozesses

**Zusammenfassung:** Es ist die Begründung der stufenweisen Trennung der Suspensionspolymerisation von Methylmethacrylat und deren Durchführung mittels kontinuierlicher Technologie belegt. Die zweite Stufe des Prozesses – die Herbeiführung eines Zustands, in dem die Dichte der Kohlenwasserstoffphase (HP) geringer ist als die der wässrigen Phase – ist untersucht. Laboruntersuchungen sind durchgeführt, um die Stabilität des Systems in Abhängigkeit von seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften zu bestimmen. Die Abhängigkeiten der Lebensdauer der HP-Partikel von ihrem Durchmesser, dem Winkel der Rührflügel, dem Umsatzgrad und der Stabilisatorkonzentration sind ermittelt, wodurch optimale Bedingungen für diese Polymerisationsstufe identifiziert worden sind. Es ist ein patentiertes Polymerisationsreaktordesign zur Durchführung der ersten und zweiten Stufe des Prozesses vorgeschlagen.

## Optimisation des paramètres technologiques physico-chimique du procédé continu de polymérisation du méthacrylate de méthyle en suspension

**Résumé:** Est justifiée la nécessité de la separation du processus de polymérisation en suspension du méthacrylate de méthyle en phase et de sa réalisation par une technologie continue. La deuxième étape du processus est étudiée – amener le système de réaction à un état où la densité de la phase hydrocarbonée (PH) est inférieure à la densité de la phase aqueuse. Dans des conditions de laboratoire, des études sont menées sur la stabilité du système en raison de ses propriétés physico-chimiques. La «durée de vie» des particules PH dépend de leur diamètre, de l'angle d'inclinaison des lames du dispositif d'agitation, du degré de conversion, de la concentration en stabilité, c'est-à-dire que les modes optimaux pour cette étape de polymérisation sont trouvés. Pour la première et la deuxième étape du processus, une conception brevetée du réacteur polymérisateur est proposée.

---

**Авторы:** *Галкин Павел Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Зарандия Жанна Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика»; *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; *Малин Павел Михайлович* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Абрамов Михаил Сергеевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ С НАПОЛНИТЕЛЕМ, ПОЛУЧЕННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКОЙ

Л. А. Щербакова<sup>1</sup>, А. А. Уварова<sup>2</sup>✉, Р. Р. Сафаров<sup>3</sup>, М. Г. Гордиенко<sup>2</sup>

*Лаборатория разработки инновационных назальных и ингаляторных препаратов (1),  
кафедра химического и фармацевтического инжиниринга (2),  
Anastasia.uvarova2@yandex.ru; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический  
университет имени Д. И. Менделеева», Россия, Москва;  
ООО «ТД «Химмед» (3), Россия, Москва*

**Ключевые слова:** дозирующий ингалятор; каскадный импактор нового поколения; лактоза; распылительная сушка; туберкулез.

**Аннотация:** Изучено влияние типа и концентрации наполнителя (моногидрата лактозы) на полноту извлечения дозы из дозирующего порошкового ингалятора, активируемого вдохом. В состав порошковых композиций вводили лактозу двух марок: InhaLac 70 и InhaLac 120, в концентрациях 0,5 и 2 масс. % соответственно. В рамках исследования аэродинамического распределения частиц с применением каскадного импактора нового поколения проведена оценка эффективности извлечения дозы. Отмечено, что добавление лактозы оказывает разное влияние на исследуемые образцы, что обусловлено различием их составов. Наибольшая эффективность достигнута для образца, содержащего поливинилпирролидон и более низкую концентрацию L-лейцина, в смеси с 2 масс. % моногидрата лактозы InhaLac 120. По результатам исследований показано, что доля неизвлеченного порошка для данной смеси снизилась с 19,7 до 10,1 %.

---

### Введение

Туберкулез является ведущим инфекционным заболеванием с высокой смертностью во всем мире. Согласно статистическим данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в 2021 году в мире было зарегистрировано 10,4 млн случаев заболевания туберкулезом, в 2022 году – 10,7 млн случаев, в 2023 году – 10,8 млн случаев, что свидетельствует о тенденции роста заболеваемости [1]. В соответствии с Глобальной стратегией по ликвидации туберкулеза на 2016 – 2035 годы, принятой ВОЗ, целью к 2035 году является снижение смертности от туберкулеза на 95 % [2].

Низкая эффективность современных подходов терапии туберкулеза связана с преждевременным прекращением приема лекарственных препаратов, что обусловлено значительной продолжительностью терапии и развитием побочных эффектов [3]. Отсутствие адекватного лечения туберкулеза повышает риск летального исхода.

В настоящее время распространено пероральное и парентеральное введение противотуберкулезных препаратов. Пероральный путь введения является удобным и экономически доступным. Однако данный способ имеет ряд существенных недостатков: замедленное начало действия, деградацию препаратов в желудочно-

кишечном тракте и эффект «первого прохождения» через печень. Парентеральный путь обеспечивает максимальную биодоступность лекарственных средств, исключает эффект «первого прохождения» через печень и воздействие факторов желудочно-кишечного тракта [4]. Тем не менее парентеральное введение сопровождается болевыми ощущениями, необходимостью привлечения квалифицированного медицинского персонала, что негативно влияет на комплаентность. Важно отметить, что и пероральный, и парентеральный пути введения зачастую не обеспечивают достижения необходимой терапевтической концентрации препаратов в очаге туберкулезной инфекции.

Ингаляционный путь введения активных фармацевтических субстанций (АФС) представляет собой эффективный и перспективный подход для лечения респираторных заболеваний. Ингаляционная терапия обеспечивает адресную доставку лекарственного вещества непосредственно в дыхательные пути и быстрое достижение высоких местных концентраций АФС при применении лекарственных средств в относительно небольших дозах, что способствует снижению системной концентрации препарата и минимизации риска развития нежелательных побочных эффектов [5].

За последние десятилетия значительно возросло количество научных работ, посвященных ингаляционной доставке противотуберкулезных препаратов [6 – 9]. Установлено, что многие из существующих противотуберкулезных препаратов, таких как изониазид, рифампицин, пиразинамид (препараты первой линии), аминогликозиды, капреомицин и парааминосалициловая кислота (препараты второй линии), подходят для ингаляционной терапии. Кроме этого, разработаны и предложены такие лекарственные средства, как бедаквилин, деламанид, сутезолид и посизолид.

Среди современных противотуберкулезных препаратов первого ряда изониазид демонстрирует наибольшую эффективность в уничтожении быстрорастущих штаммов *M. tuberculosis* в легких, благодаря минимальной ингибирующей концентрации, составляющей 0,1...0,7 мкг/мл [10]. Изониазид проникает в микобактериальные клетки путем пассивной диффузии через клеточную стенку [11]. Препарат не является токсичным, однако попав внутрь микобактериальной клетки, действует как пролекарство [12].

Получение сухих противотуберкулезных препаратов возможно при помощи распылительной сушки. Распылительная сушка широко применяется в фармацевтической промышленности благодаря своей масштабируемости, непрерывности процесса и возможности получения частиц с заданными свойствами для эффективной доставки лекарств в легкие [13]. Однако для того чтобы повысить качество и стабильность продукта, необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на оптимизацию составов и технологического процесса.

Ингаляционная доставка лекарственных средств с использованием полимерных нано- и микрочастиц представляет собой перспективную стратегию повышения эффективности терапии туберкулеза. Данный подход позволяет увеличить биодоступность лекарственных веществ в легочной ткани, обеспечить пролонгированное высвобождение АФС, а также снизить системные побочные эффекты [14]. Для получения полимерных частиц могут использоваться различные биоразлагаемые и биосовместимые полимеры, такие как полисахариды, альбумин, желатин, хитозан или синтетические полимеры – полимолочная кислота, поликапролактон, полимолочная со-гликолевая кислота [15]. Эффективность полимерных микросфер в терапии туберкулеза подтверждена в различных исследованиях [16, 17].

Одним из распространенных подходов к улучшению аэрозольных характеристик порошковых композиций для дозированных порошковых ингаляторов является введение в состав смесей частиц-носителей крупной фракции. Такой подход

предполагает, что мелкие частицы АФС (1...5 мкм) прикрепляются к более крупным частицам-носителям (30...200 мкм), что облегчает дозирование и обеспечивает стабильность ингаляционных композиций при хранении [18]. Микрочастицы АФС, обладающие высокой поверхностной свободной энергией, подвержены агрегации под действием электростатических сил, что ухудшает сыпучесть и диспергируемость порошка. Использование частиц-носителей помогает снизить влияние этих факторов и улучшить аэродинамические свойства порошка. В качестве носителя для ингаляционной доставки широко применяется моногидрат  $\alpha$ -лактозы. Альтернативными носителями являются маннит, трегалоза и ксилит. Соотношение АФС и носителя в составах, как правило, составляет 1 : 67,5 [19].

Ключевыми факторами, определяющими эффективность такой системы, является соотношение когезионных и адгезионных сил. Эти силы должны находиться в оптимальном диапазоне: быть достаточно слабыми, чтобы избежать агломерации и сегрегации, но достаточно прочными, чтобы обеспечить стабильное удержание активного вещества до момента активации дозы. При соблюдении данных условий крупные частицы лактозы оседают в верхних отделах дыхательных путей (в частности, в гортани), в то время как АФС отделяется от носителя и проникает в нижние дыхательные пути.

Таким образом, можно отметить, что разработка составов ингаляционных противотуберкулезных препаратов совместно с дозирующими устройствами для их применения является актуальной задачей.

## Материалы и методы

### Материалы

В качестве АФС использован изониазид. Фармацевтическая субстанция синтезирована на кафедре органической химии Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева. Подлинность и чистота изониазида подтверждены соответствующими аналитическими методами.

В качестве вспомогательных веществ использованы: маннитол марки D(-)-маннит Е 421 (*далее* – D-маннит) (Merck, Германия); аминокислота L-лейцин (Suzhou Vitajoy Bio-Tech Co., Китай); поливинилпирролидон (ПВП) марки K-30 (NEO Chemical, Россия). В качестве инертных крупных частиц-носителей, одновременно выполняющих роль дезинтегратора, использовались две марки ингаляционной лактозы InhaLac 70 и InhaLac 120 (Meggle, Германия).

### Дозирующий порошковый ингалятор, активируемый вдохом

В основу конструкции дозирующего порошкового ингалятора (ДПИ), активируемого вдохом, взят принцип работы ДПИ Twincer [20] (рис. 1). Отсек с порошком располагается на пути потока воздуха, который возникает при вдохе пациента.

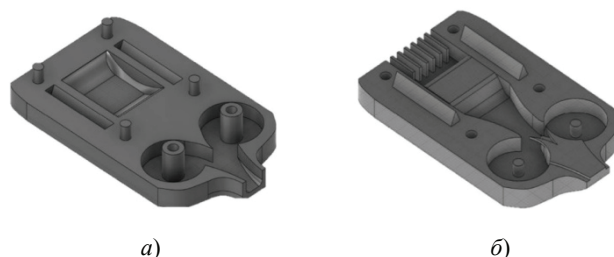


Рис. 1. Нижняя (а) и верхняя (б) части сборной конструкция ДПИ

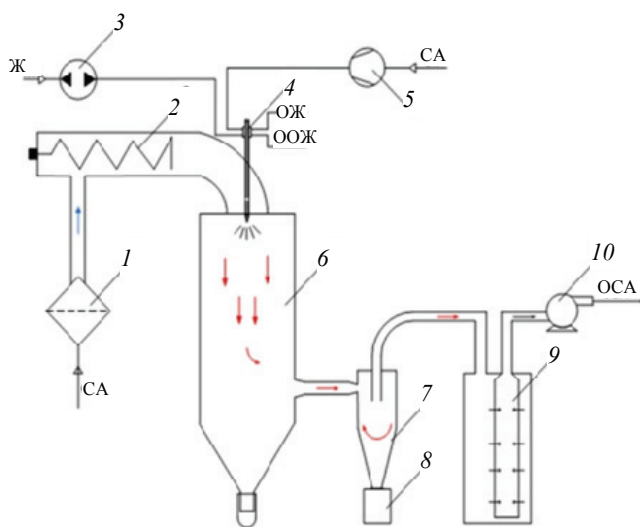
Проходящий воздух аэрирует частицы порошка и уносит их. Взвешенные частицы проходят через два классификатора в форме круговых каналов, что способствует их деагломерации, и поступают через выходное отверстие в верхние дыхательные пути пациента. Подробное описание предложенной конструкции и обоснование ее работоспособности методами вычислительной гидродинамики приведено в работе [21].

Дозирующий порошковый ингалятор напечатан с помощью 3D-принтера Phrozen Sonic Mini 8K методом жидкокристаллической стереолитографии с использованием фотополимера Harz Labs Industrial Black, обеспечивающего высокую точность воспроизведения геометрии и достаточную прочность модели, для проведения дальнейших экспериментальных исследований.

### Получение порошковых композиций

Ингаляционные порошки получены в соответствии с методикой, представленной в работе [22]. Составы порошков и условия их наработки распылительной сушкой оптимизированы на основании комплексных исследований и приведены в табл. 1. В мерный стеклянный стакан вносят дистиллированную воду и поочередно при перемешивании на магнитной мешалке вводят навески ПВП К-30 (при необходимости), L-лейцина, D-маннита, изониазида. Новую навеску вводят после полного растворения предыдущей. Полученный раствор сушат распылением при заданных параметрах. В работе использовалась установка Mini Spray Dryer B-290 (BÜCHI, Швейцария) (рис. 2).

После завершения распылительной сушки порошок собирают в предварительно промаркированные пенициллиновые флаконы, закрывают резиновой крышкой и обжимают алюминиевым колпачком для герметизации. Образцы хранят в комнатных условиях.



**Рис. 2. Схема лабораторной распылительной сушилки BÜCHI Mini Spray Dryer B-290:** 1 – фильтр очистки сушильного агента; 2 – электрокалорифер; 3 – перистальтический насос; 4 – пневматическая форсунка; 5 – компрессор; 6 – сушильная камера; 7 – циклон; 8 – сборник для готового продукта; 9 – рукавный фильтр; 10 – насос для отработанного сушильного агента; СА – сушильный агент; ОЖ – отработанная охлаждающая жидкость; ООЖ – охлаждающая жидкость; ОСА – отработанный сушильный агент

Таблица 1

Составы и условия получения порошковых композиций

Образец	ПВП, г	D-маннит, г	L-лейцин, г	Изониазид, г	Вода, г	Параметры сушки
I	0	5,6	1,4	0,5	109,65	Расход сушильного агента 37 м <sup>3</sup> /ч; расход сжатого воздуха на форсунку 601 л/ч; температура сушильного агента на входе в камеру 150 °С; мощность перистальтического насоса 55 %
II	1,6	4,75	0,7	0,5	109,65	Расход сушильного агента 37 м <sup>3</sup> /ч; расход сжатого воздуха на форсунку 601 л/ч; температура сушильного агента на входе в камеру 150 °С; мощность перистальтического насоса 45 %

Исследование свойств порошковых композиций

*Влагосодержание.* Влагоанализатор Axis AGS500 (Axis, Швеция) использовали для определения влагосодержания порошков после проведения распылительной сушки. Измерения проводились в автоматическом режиме при температуре 40 °С.

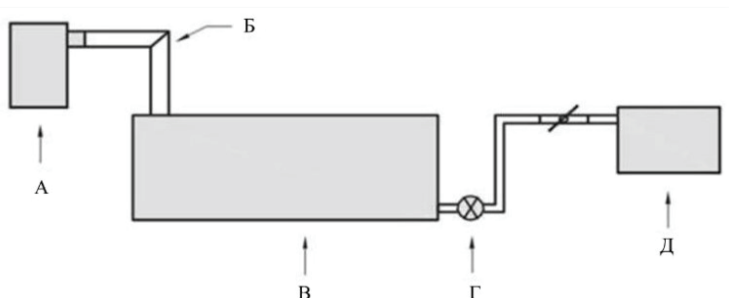
*Угол естественного откоса.* Для определения угла естественного откоса использовался электронный угломер ADA AngleMeter 40 (ADA Instruments, Китай). Измерение значения проводили не менее чем в трех повторях в трех плоскостях и выражали в угловых градусах.

*Насыпная плотность.* Для измерения значений насыпной плотности порошок помещался в микропробирку (Eppendorf, Германия) объемом 1 мл. Насыпная плотность рассчитывалась как отношение массы порошка к занимаемому объему, включая все пустоты между частицами.

*Гранулометрический состав.* Для получения распределений частиц полученных порошков по размерам и определений параметров  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  и  $D_{90}$  предварительно были сняты снимки образцов на микроскопе Micros MC 300 (TP) со стократным увеличением при помощи камеры Горяева. Полученные изображения были обработаны для определения размеров частиц с помощью программы ImageJ.

*Определение извлекаемой дозы.* Определение извлекаемой из порошкового ингалятора, активируемого вдохом, дозы проводили одновременно с исследованием аэродинамического распределения частиц. Дозирующий порошковый ингалятор предварительно взвешивают на аналитических весах. В отсек ДПИ загружают 200 мг образца, с помощью системы «шип – паз» фиксируют крышку и присоединяют его к каскадному импактору нового поколения (NGI, Copley, Великобритания) через Г-образный переходник, имитирующий геометрию ротоглотки. Импактор подключают к системе регулирования потока воздуха в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3. Исследования проводят при скорости потока воздуха 60 л/мин. После каждого исследования ДПИ отсоединяют от переходника импактора и повторно взвешивают. По разнице масс определяют массу неизвлекаемой дозы и далее рассчитывают массу извлекаемой дозы. Значения усредняют по результатам серии испытаний.





**Рис. 3. Схема подключения:**

А – ДПИ; Б – Г-образный переходник; В – импактор; Г – клапан контроля потока; Д – насос

### Результаты и обсуждение

Основные характеристики порошковых композиций I и II приведены в табл. 2. Микроскопические исследования показали, что полученные образцы имеют размеры частиц, соответствующие респираторной фракции (от 1 до 5 мкм) [23].

Измеренные значения неизвлекаемой дозы для исходных образцов I и II приведены в табл. 3. Исследования показали, что не весь порошок полностью извлекается из ДПИ. Причиной такого поведения может быть наличие статического заряда, что приводит к агломерации частиц, а также недостаточная интенсивность аэрации частиц.

В работах [19, 24, 25] показано, что для повышения текучести порошка для ингаляций и его аэрируемости в состав может быть введен моногидрат лактозы, частицы которого имеют большие размеры, менее подвержены накоплению статического

Таблица 2

**Характеристики порошковых композиций I и II**

Образец	Влагосодержание, %	Угол откоса, °	Насыпная плотность, г/мл	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
				мкм		
I	3,8	16	0,3	3,5	4,7	5,8
II	3,6	21	0,4	2,7	3,7	4,8

Таблица 3

**Доля неизвлекаемой дозы для исходных порошков для ингаляций и смесей, полученных при добавлении различных типов лактозы к исходным образцам**

Образец	Без введения лактозы	Тип лактозы			
		InhaLac 70		InhaLac 120	
		Концентрация, масс. %			
		0,5	2	0,5	2
I	$\mu = 24,41 \%$ ; $\sigma = 5,34$	$\mu = 26,63 \%$ ; $\sigma = 6,89$	$\mu = 24,10 \%$ ; $\sigma = 5,90$	$\mu = 24,35 \%$ ; $\sigma = 4,77$	$\mu = 22,43 \%$ ; $\sigma = 7,16$
II	$\mu = 19,73 \%$ ; $\sigma = 7,84$	$\mu = 18,53 \%$ ; $\sigma = 10,15$	$\mu = 18,43 \%$ ; $\sigma = 4,74$	$\mu = 13,20 \%$ ; $\sigma = 3,55$	$\mu = 10,10 \%$ ; $\sigma = 1,60$

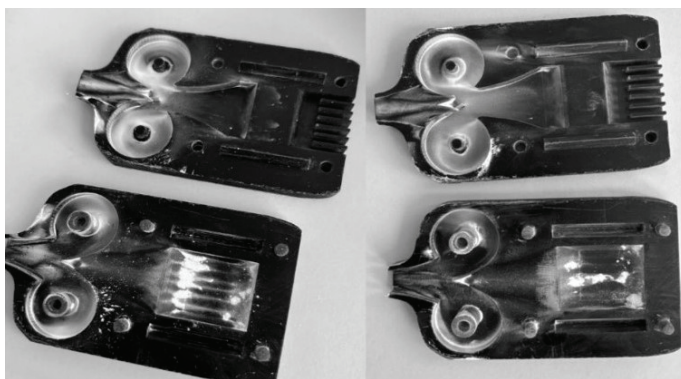
Примечание:  $\mu$  – среднее значение неизвлекаемой дозы;  $\sigma$  – дисперсия.

заряда и, как результат, выполняют роль активатора аэрации и инертного носителя. После извлечения такой смеси из ДПИ крупная фракция (вещество-носитель) оседает в ротоглотке, а мелкая – поступает в верхние и нижние дыхательные пути. В работах показано, что концентрация инертного носителя и его фракционный состав являются ключевыми факторами.

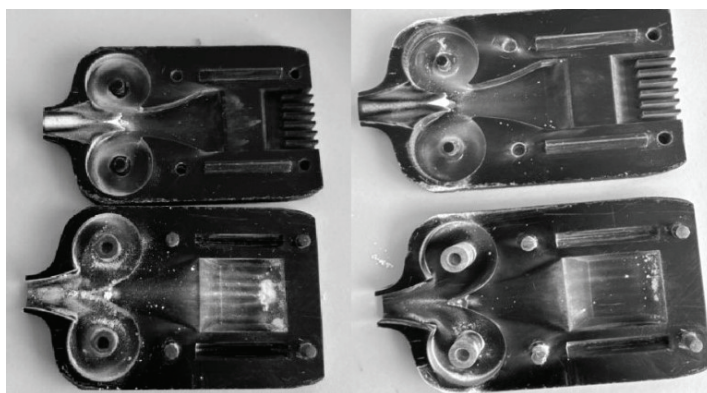
В данном исследовании использовался моногидрат лактозы двух марок InhaLac 70 ( $D_{10}=110\ldots160$  мкм,  $D_{50}=180\ldots250$  мкм,  $D_{90}=270\ldots340$  мкм) и InhaLac 120 ( $D_{10}=70\ldots105$  мкм,  $D_{50}=110\ldots155$  мкм,  $D_{90}=160\ldots215$  мкм). Лактоза вводилась в состав образцов I и II в концентрациях 0,5 и 2 масс. % соответственно непосредственно перед испытаниями (см. табл. 3).

Введение любого из рассмотренных инертных носителей в образец I не привело к снижению доли неизвлекаемой дозы. В случае смесей с образцом II введение в состав инертного носителя InhaLac 120 позволило снизить долю неизвлекаемой дозы до 10,1 % при условии, что концентрация инертного носителя составила 2 масс. %. При этом дисперсия, характеризующая воспроизводимость наблюдений, также снизилась и составила  $\sigma = 1,60$ .

На рисунке 4 представлены визуальные доказательства положительного влияния добавления лактозы на процесс дозирования: слева показано состояние ДПИ после использования композиций без добавки носителя, тогда как справа – после применения смеси с лактозой. Наглядно видно, что остаточное содержание порошка в ДПИ значительно снижается.



а)



б)

**Рис. 4. Результаты экспериментов:**

образец I (а) и образец II (б) без добавления носителя (слева); с 2 % InhaLac 120 (справа)

Различие во влиянии инертного носителя на поведение смесей с образцами I и II может быть связано с различием в составах исходных композиций. Образец I содержит большую долю L-лейцина, который в ряде работ используется в качестве вспомогательного вещества, снижающего гигроскопичность порошков и улучшающий их сыпучесть [26, 27], и не содержит ПВП – водорастворимого полимера, проявляющего адгезионные свойства. Образец II, наоборот, содержит ПВП и более низкие концентрации L-лейцина. Это может приводить к лучшей адгезии частиц образца с частицами инертного носителя как за счет статического поверхностного заряда, так и за счет адгезии.

### Заключение

Экспериментально показано, что на полноту извлечения дозы из ингалятора, активируемого вдохом, влияет не только тип и концентрация инертного носителя, но и свойства самого порошка для ингаляций, определяемые его составом. Сравнительный анализ результатов испытаний композиции II без лактозы и с ней показал, что добавление 2 масс. % лактозы InhaLac 120 способствует более полному высвобождению порошка из ингалятора, обеспечивая извлечение дозы на уровне около 90 %.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект FSSM-2025-0003).*

### Список литературы

1. Global tuberculosis report 2023. Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 75 p. – URL : <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/cc23b85f-72c0-4177-8137-cb1161da1025/content> (дата обращения: 18.11.2025).
2. Реализация стратегии ликвидации туберкулеза: основные положения [Implementing the end TB strategy: the essentials]. – Женева : Всемирная организация здравоохранения, 2018. – 113 с. – URL : <https://edu.nmrc.ru/wp-content/uploads/2019/12/Реализация-стратегии-ликвидации-туберкулеза.pdf> (дата обращения: 18.11.2025).
3. Global Health and Tuberculosis; Past, Present, and Future / S. Sankineni, S. Chauhan, R. Shegokar, Y. V. Pathak // In book: Tubercular Drug Delivery Systems. – Springer International Publishing, 2023. – P. 1 – 13. doi: 10.1007/978-3-031-14100-3\_1
4. Ким, М. Е. Противотуберкулезные лекарственные формы: ассортимент, основные преимущества, перспективы технологического совершенствования / М. Е. Ким, К. Б. Мурзагулова, Э. Ф. Степанова // Фармация и фармакология. – 2016. – Т. 4, № 3. – С. 38 – 55. doi: 10.19163/2307-9266-2016-4-3-38-55
5. Herriges, M. Lung development: orchestrating the generation and regeneration of a complex organ / M. Herriges, E. E. Morrissey // Development. – 2014. – Vol. 141, No. 3. – P. 502 – 513. doi: 10.1242/dev.098186
6. Brunaugh, A. D. Inhaled fixed-dose combination powders for the treatment of respiratory infections / A. D. Brunaugh, S. Sharma, H. Smyth // Expert Opinion on Drug Delivery. – 2021. – Vol. 18, No. 12. – P. 1101 – 1115. doi: 10.1080/17425247.2021.1886074
7. Novel Approaches for the Treatment of Pulmonary Tuberculosis / Z. M. Tan, G. P. Lai, M. Pandey, T. Srichana, M. R. Pichika, B. Gorain, S. K. Bhattamishra, H. Choudhury // Pharmaceutics. – 2020. – Vol. 12, No. 12. – Art. 1196. doi: 10.3390/pharmaceutics12121196

8. Targeting Pulmonary Tuberculosis Using Nanocarrier-Based Dry Powder Inhalation: Current Status and Futuristic Need / T. S. Patil, A. S. Deshpande, S. Deshpande, P. Shende // *Journal of Drug Targeting*. – 2019. – Vol. 27, No. 1. – P. 12 – 27. doi: 10.1080/1061186X.2018.1455842
9. Potential of Dry Powder Inhalers for Tuberculosis Therapy: Facts, Fidelity and Future / P. Mehta, C. Bothiraja, S. Kadam, A. Pawar // *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 46, No. 3. – P. S791–S806. doi: 10.1080/21691401.2018.1513938
10. Fernandes, G. Isoniazid: A Review of Characteristics, Properties and Analytical Methods / G. Fernandes, H. Salgado, J. L. D. Santos // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. – 2017. – Vol. 47, No. 4. – P. 298 – 308. doi: 10.1080/10408347.2017.1281098
11. Oxidation of isoniazid by manganese and *Mycobacterium tuberculosis* catalase-peroxidase yields a new mechanism of activation / J. Bodiguel, J. M. Nagy, K. A. Brown, B. Jamart-Grégoire // *Journal of the American Chemical Society*. – 2001. – Vol. 123, No. 16. – P. 3832–3833. doi: 10.1021/ja002674f
12. Изучение влияния модификации структуры нового производного хиназолин-4(3h)-она на синтазу жирных кислот (FAS) *Mycobacterium* / А. А. Старикова, М. А. Самотруева, Н. В. Золотарева, А. А. Цибизова, Д. В. Мережкина, А. А. Озеров // *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. – 2023. – Т. 26, № 7. – С. 34 – 40. doi: 10.29296/25877313-2023-07-05
13. Исследование влияния полимерной матрицы и технологических параметров распылительной сушки на свойства порошковой ингаляционной композиции / Л. А. Щербакова, Е. А. Петрикова, М. Г. Гордиенко, Р. Р. Сафаров, А. Е. Щекотихин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 687 – 696. doi:10.17277/vestnik.2024.04
14. Shaji, J. Formulation, optimization, and characterization of biocompatible inhalable d-cycloserine-loaded alginate-chitosan nanoparticles for pulmonary drug delivery / J. Shaji, M. Shaikh // *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. – 2016. – Vol. 9, No. 8. – P. 82 – 95. doi: 10.22159/ajpcr.2016.v9s2.11814
15. Exploring inhalable polymeric dry powders for anti-tuberculosis drug delivery / M. S. Miranda, M. T. Rodrigues, R. M. A. Domingues, E. Torrado, R. L. Reis, J. Pedrosa, M. E. Gomes // *Materials Science and Engineering C*. – 2018. – No. 93. – P. 1090 – 1103. doi: 10.1016/j.msec.2018.09.004
16. Omar, S. M. Pulmonary Delivery of Isoniazid in Nanogel-Loaded Chitosan Hybrid Microparticles for Inhalation / S. M. Omar, N. A. Maziad, N. M. El-Tantawy // *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*. – 2019. – Vol. 32, No. 2. – P. 78 – 87. doi: 10.1089/jamp.2018.1460
17. Therapeutic aerosol bioengineering of targeted, inhalable microparticle formulations to treat *Mycobacterium tuberculosis* (MTb) / C. Lawlor, M. P. O'Sullivan, B. Rice, P. Dillon, P. J. Gallagher, S. O'Leary, S. Shoyele, J. Keane, S-A. Cryan // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2012. – Vol. 23, No. 1. – P. 89 – 98. doi: 10.1007/s10856-011-4511-4
18. Rahimpour, Y. Alternative carriers in dry powder inhaler formulations / Y. Rahimpour, M. Kouhsoltani, H. Hamishehkar // *Drug Discovery Today*. – 2014. – Vol. 19, No. 5. – P. 618 – 626. doi: 10.1016/j.drudis.2013.11.013
19. Dry powders for oral inhalation free of lactose carrier particles / A. M. Healy, M. I. Amaro, K. J. Paluch, L. Tajber // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2014. – No. 75. – P. 32 – 52. doi: 10.1016/j.addr.2014.04.005
20. Foged, C. Thermostable Subunit Vaccines for Pulmonary Delivery: How Close Are We? / C. Foged // *Current Pharmaceutical Design*. – 2016. – Vol. 22, No. 17. – P. 2561 – 2576. doi: 10.2174/1381612822666160202141603

21. Разработка конструкции дозирующего порошкового ингалятора / А. И. Саитгареева, А. А. Абрамов, Л. А. Щербакова, М. Г. Гордиенко // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 9(288). – С. 74 – 76.
22. Исследование ингаляционных микропорошков, полученных методом распылительной сушки / Л. А. Щербакова, А. И. Саитгареева, М. Г. Гордиенко, Р. Р. Сафаров // Тонкие химические технологии. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 327 – 336. doi: 10.32362/2410-6593-2024-19-4-327-336
23. Назальные и ингаляционные препараты / М. Г. Гордиенко, Н. В. Меньшуткина, Е. В. Гусева [и др.] ; под ред. Н. В. Меньшуткиной. – Москва : ДеЛи, 2024. – 354 с.
24. Jones, M. D. The Influence of Fine Excipient Particles on the Performance of Carrier-Based Dry Powder Inhalation Formulations / M. D. Jones, R. Price // Pharmaceutical Research. – 2006. – Vol. 23, No. 8. – P. 1665 – 1674. doi: 10.1007/s11095-006-9012-7
25. The influence of dose on the performance of dry powder inhalation systems / P. M. Young, S. Edge, D. Traini, M. D. Jones, R. Price, D. El-Sabawi, C. Urry, C. Smith // International Journal of Pharmaceutics. – 2005. Vol. 296, No. 1–2. – P. 26 – 33. doi: 10.1016/j.ijpharm.2005.02.004
26. Chew, N. Y. K. The role of particle properties in pharmaceutical powder inhalation formulations / N. Y. K. Chew, H. K. Chan // Journal of Aerosol Medicine. – 2002. – Vol. 15, No. 3. – P. 325 – 330. doi: 10.1089/089426802760292672
27. Gaspar, M. M. Inhaled liposomes-current strategies and future challenges / M. M. Gaspar, U. Bakowsky, C. Ehrhardt // Journal of Biomedical Nanotechnology. – 2008. – Vol. 4, No. 3. – P. 245 – 257. doi: 10.1166/jbn.2008.334

---

## Effect of Type and Concentration of Filler on the Completeness of Dose Extraction from a Breath-Actuated Inhaler

L. A. Shcherbakova<sup>1</sup>, A. A. Uvarova<sup>2✉</sup>, R. R. Safarov<sup>3</sup>, M. G. Gordienko<sup>2</sup>

*Laboratory for the Development of Innovative Nasal and Inhalation Drugs (1),*

*Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering (2),*

*Anastasia.uvarova2@yandex.ru;*

*D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia;*

*Chimmed Group LLC (3), Moscow, Russia*

**Keywords:** metered-dose inhaler; next-generation cascade impactor; lactose; spray-drying; tuberculosis.

**Abstract:** The effect of the filler type and concentration (lactose monohydrate) on the completeness of dose extraction from a breath-actuated metered-dose powder inhaler was studied. Two grades of lactose, InhaLac 70 and InhaLac 120, were added to the powder compositions at concentrations of 0.5 and 2 % by weight, respectively. Dose extraction efficiency was assessed using a new-generation cascade impactor to study the aerodynamic distribution of particles. It was noted that the addition of lactose had different effects on the samples under study, which was due to the differences in their compositions. The highest efficiency was achieved for the sample containing polyvinylpyrrolidone and a lower concentration of L-leucine, mixed with 2 % by weight of lactose. % of lactose monohydrate InhaLac 120. The research results showed that the proportion of unextracted powder for this mixture decreased from 19.7 to 10.1 %.



## References

1. Global tuberculosis report 2023. Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 75 p., available at: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/cc23b85f-72c0-4177-8137-cb1161da1025/content> (accessed 18 November 2025).
2. Implementing the end TB strategy: the essentials, available at: <https://edu.nmrc.ru/wp-content/uploads/2019/12/Реализация-стратегии-ликвидации-туберкулеза.pdf> (accessed 18 November 2025).
3. Sankineni S., Chauhan S., Shegokar R., Pathak Y.V. Global Health and Tuberculosis; Past, Present, and Future, In book: *Tubercular Drug Delivery Systems*, Springer International Publishing, 2023, pp. 1-13. doi: 10.1007/978-3-031-14100-3\_1
4. Kim M.E., Murzagulova K.B., Stepanova E.F. Antituberculosis drug dosage forms: range, key benefits and prospects of technological improvement, *Pharmacy & Pharmacology*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 38-55. doi: 10.19163/2307-9266-2016-4-3-38-55
5. Herriges M., Morrissey E.E. Lung development: orchestrating the generation and regeneration of a complex organ, *Development*, 2014, vol. 141, no. 3, pp. 502-513. doi: 10.1242/dev.098186
6. Brunaugh A.D., Sharma S., Smyth H. Inhaled fixed-dose combination powders for the treatment of respiratory infections, *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2021, vol. 18, no. 12, pp. 1101-1115. doi: 10.1080/17425247.2021.1886074
7. Tan Z.M., Lai G.P., Pandey M., Srichana T., Pichika M.R., Gorain B., Bhattamishra S.K., Choudhury H. Novel Approaches for the Treatment of Pulmonary Tuberculosis, *Pharmaceutics*, 2020, vol. 12, no. 12, art. 1196. doi: 10.3390/pharmaceutics12121196
8. Patil T.S., Deshpande A.S., Deshpande S., Shende P. Targeting Pulmonary Tuberculosis Using Nanocarrier-Based Dry Powder Inhalation: Current Status and Futuristic Need, *Journal of Drug Targeting*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 12-27. doi: 10.1080/1061186X.2018.1455842
9. Mehta P., Bothiraja C., Kadam S., Pawar A. Potential of Dry Powder Inhalers for Tuberculosis Therapy: Facts, Fidelity and Future, *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 2018, vol. 46, no. 3, pp. S791-S806. doi: 10.1080/21691401.2018.1513938
10. Fernandes G., Salgado H., Santos J.L.D. Isoniazid: A Review of Characteristics, Properties and Analytical Methods, *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 298-308. doi: 10.1080/10408347.2017.1281098
11. Bodiguel J., Nagy J.M., Brown K.A., Jamart-Grégoire B. Oxidation of isoniazid by manganese and Mycobacterium tuberculosis catalase-peroxidase yields a new mechanism of activation, *Journal of the American Chemical Society*, 2001, vol. 123, no. 16, pp. 3832-3833. doi: 10.1021/ja002674f
12. Starikova A.A., Samotrueva M.A., Zolotareva N.V., Tsibizova A.A., Merezhkina D.V., Ozerov A.A. [Study of the influence of modification of the structure of a new derivative of quinazolin-4(3h)-one on fatty acid synthase (FAS) of Mycobacterium], *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii* [Issues of biological, medical and pharmaceutical chemistry], 2023, vol. 26, no. 7, pp. 34-40. doi: 10.29296/25877313-2023-07-05 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Shcherbakova L.A., Petrikova Ye.A., Gordiyenko M.G., Safarov R.R., Shchekotikhin A.Ye. [Study of the influence of the polymer matrix and technological parameters of spray drying on the properties of a powder inhalation composition], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 687-696. doi:10.17277/vestnik.2024.04 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Shaji J., Shaikh M. Formulation, optimization, and characterization of biocompatible inhalable d-cycloserine-loaded alginate-chitosan nanoparticles for pulmonary drug delivery, *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 2016, vol. 9, no. 8, pp. 82-95. doi: 10.22159/ajpcr.2016.v9s2.11814
15. Miranda M.S., Rodrigues M.T., Domingues R.M.A., Torrado E., Reis R.L., Pedrosa J., Gomes M.E. Exploring inhalable polymeric dry powders for anti-tuberculosis drug delivery, *Materials Science and Engineering C*, 2018, no. 93, pp. 1090-1103. doi: 10.1016/j.msec.2018.09.004
16. Omar S.M., Maziad N.A., El-Tantawy N.M. Pulmonary Delivery of Isoniazid in Nanogel-Loaded Chitosan Hybrid Microparticles for Inhalation, *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 78-87. doi: 10.1089/jamp.2018.1460
17. Lawlor C., O'Sullivan M.P., Rice B., Dillon P., Gallagher P.J., O'Leary S., Shoyele S., Keane J., Cryan S-A. Therapeutic aerosol bioengineering of targeted, inhalable microparticle formulations to treat Mycobacterium tuberculosis (MTb), *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2012, vol. 23, no. 1, pp. 89-98. doi: 10.1007/s10856-011-4511-4
18. Rahimpour Y., Kouhsoltani M., Hamishehkar H. Alternative carriers in dry powder inhaler formulations, *Drug Discovery Today*, 2014, vol. 19, no. 5, pp. 618-626. doi: 10.1016/j.drudis.2013.11.013
19. Healy A.M., Amaro M.I., Paluch K.J., Tajber L. Dry powders for oral inhalation free of lactose carrier particles, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2014, no. 75, pp. 32-52. doi: 10.1016/j.addr.2014.04.005
20. Foged C. Thermostable Subunit Vaccines for Pulmonary Delivery: How Close Are We?, *Current Pharmaceutical Design*, 2016, vol. 22, no. 17, pp. 2561-2576. doi: 10.2174/1381612822666160202141603
21. Saitgareyeva A.I., Abramov A.A., Shcherbakova L.A., Gordiyenko M.G. [Development of a Metered-Dose Powder Inhaler Design], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2024, vol. 38, no. 9(288), pp. 74-76. (In Russ., abstract in Eng.)
22. Shcherbakova L.A., Saitgareyeva A.I., Gordiyenko M.G., Safarov R.R. [Study of Inhalation Micropowders Obtained by Spray Drying], *Tonkiye khimicheskkiye tekhnologii* [Fine Chemical Technologies], 2024, vol. 19, no. 4, pp. 327-336. doi: 10.32362/2410-6593-2024-19-4-327-336 (In Russ., abstract in Eng.)
23. Gordiyenko M.G., Men'shutina N.V. (Ed.), Guseva Ye.V. [et al.], *Nazal'nyye i ingalyatsionnyye preparaty* [Nasal and inhalation drugs], Moscow: DeLi, 2024, 354 p. (In Russ.)
24. Jones M.D., Price R. The Influence of Fine Excipient Particles on the Performance of Carrier-Based Dry Powder Inhalation Formulations, *Pharmaceutical Research*, 2006, vol. 23, no. 8, pp. 1665-1674. doi: 10.1007/s11095-006-9012-7
25. Young P.M., Edge S., Traini D., Jones M.D., Price R., El-Sabawi D., Urry C., Smith C. The influence of dose on the performance of dry powder inhalation systems, *International Journal of Pharmaceutics*, 2005, vol. 296, no. 1-2, pp. 26-33. doi: 10.1016/j.ijpharm.2005.02.004
26. Chew N.Y.K., Chan H.K. The role of particle properties in pharmaceutical powder inhalation formulations, *Journal of Aerosol Medicine*, 2002, vol. 15, no. 3, pp. 325-330. doi: 10.1089/089426802760292672
27. Gaspar M.M., Bakowsky U., Ehrhardt C. Inhaled liposomes—current strategies and future challenges, *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 2008, vol. 4, no. 3, pp. 245-257. doi: 10.1166/jbn.2008.334



## Untersuchung der Eigenschaften von Pulvern mit Füllstoff, die durch Sprühtrocknung erhalten sind

**Zusammenfassung:** Es ist der Einfluss der Art und Konzentration des Füllstoffs (Laktose-Monohydrat) auf die vollständige Dosisextraktion aus einem atemzuggesteuerten Dosieraerosol untersucht. Zwei Laktosepräparate, InhaLac 70 und InhaLac 120, waren den Pulvermischungen in Konzentrationen von 0,5 bzw. 2 Gew.-% zugesetzt. Die Dosisextraktionseffizienz ist im Rahmen einer Studie zur aerodynamischen Partikelverteilung mithilfe eines Kaskadenimpaktors der nächsten Generation bestimmt. Es ist festgestellt, dass die Zugabe von Laktose aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen verschiedene Auswirkungen auf die untersuchten Proben hat. Die höchste Effizienz ist mit der Probe erzielt, die Polyvinylpyrrolidon und eine geringere Konzentration an L-Leucin enthielt und mit 2 Gew.-% InhaLac 120 Laktose-Monohydrat gemischt war. Die Studienergebnisse zeigten, dass der Anteil des nicht extrahierten Pulvers bei dieser Mischung von 19,7 auf 10,1 % sank.

---

## Étude des propriétés des poudres de remplissage obtenues par séchage par pulvérisation

**Résumé:** Est étudié l'effet du type et de la concentration de la charge (monohydrate de lactose) sur l'exhaustivité de l'extraction de la dose à partir d'un inhalateur de poudre de dosage activé par inhalation. Deux marques de lactose sont introduites dans la composition des poudres: InhaLac 70 et InhaLac 120, à des concentrations de 0,5 et 2 masses de % respectivement. Dans le cadre d'une étude de la distribution aérodynamique des particules utilisant un impacteur en cascade de nouvelle génération, l'efficacité de l'extraction de la dose sont évaluée. Est noté que la supplémentation en lactose a des effets différents sur les échantillons étudiés en raison de leurs compositions différentes. La plus grande efficacité est obtenue pour un échantillon contenant de la polyvinylpyrrolidone et une concentration plus faible de l-leucine, en mélange avec 2 masses de % de lactose monohydraté InhaLac 120. Des études ont montré que la proportion de poudre non extraite pour ce mélange est passée de 19,7 à 10,1 %.

---

**Авторы:** *Щербакова Лариса Александровна* – инженер, лаборатория разработки инновационных назальных и ингаляторных препаратов; *Уварова Анастасия Анатольевна* – младший научный сотрудник кафедры химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия; *Сафаров Руслан Рафигозлы* – кандидат технических наук, директор по развитию производства, ООО «ТД «Химмед», Москва, Россия; *Гордиенко Мария Геннадьевна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химического и фармацевтического инжиниринга, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия.

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОТОТИПА СТРОИТЕЛЬНОГО 3D-ПРИНТЕРА

В. В. Кулёмин✉, А. В. Кайченев

*Кафедра автоматики и вычислительной техники, cul3min@yandex.ru;  
ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия*

**Ключевые слова:** автоматизация строительных процессов; арктическое строительство; деформационный анализ; метод конечных элементов; низкотемпературные условия; строительная 3D-печать; термокамера; числовое программное управление; шнековый экструдер.

**Аннотация:** Разработана и исследована конструкция прототипа строительного 3D-принтера, адаптированного для применения в арктических регионах России. Проведен анализ механической части принтера с использованием Autodesk Inventor Professional 2020, включая моделирование деформаций, напряжений по фон Мизесу, контактных давлений и смещений. Показано, что выбранная декартова кинематика и горизонтальный шнековый экструдер обеспечивают стабильность печати при нагрузках с минимальным коэффициентом запаса прочности 7,4 для алюминиевого каркаса. Сделан акцент на решении проблем низкотемпературной экструзии бетона, включая предварительный нагрев смеси до 60...85 °С, и создании термокамеры для ускорения набора прочности.

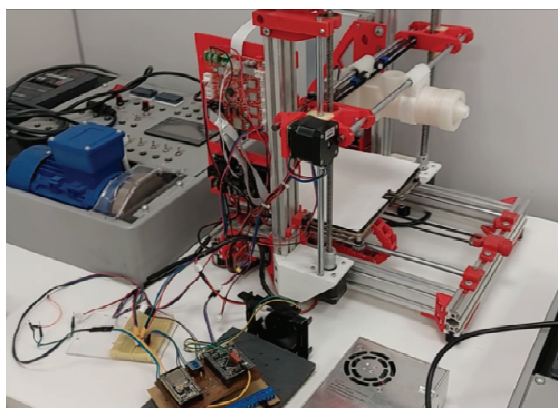
### Введение

Одним из наиболее важных средств автоматизации технологических процессов и производств в 3D-принтерах является система числового программного управления (СЧПУ), которая обеспечивает точное управление процессом печати. С помощью СЧПУ можно достигнуть высокой эффективности производства, минимизировать процент брака, автоматизировать повторяющиеся операции. Разрабатываемые программно-аппаратные комплексы могут быть использованы для создания экспериментальных конструкций, тестирования новых материалов и форм зданий с учетом разных критериев, таких как прочность, долговечность или энергоэффективность.

Прототип строительного 3D-принтера (рис. 1) можно разделить на три составные части: СЧПУ, представленную в работах [1, 2], экструдер и масштабируемую конструкцию. Рассмотрим подробнее разработку механической части прототипа.

Для анализа имеющихся решений в сфере строительной 3D-печати рассмотрены и классифицированы виды технологий трехмерной печати, применяемых в строительстве:

– FFF-FDM (Fused Deposition Modeling): экструдирование послойным методом, в процессе через сопло машины подается вязкая бетонная смесь с добавками;



**Рис. 1. Прототип строительного 3D-принтера**

- 3DP (three-dimensional printing): вязущее вещество распределяется послойно на слои сухого порошкообразного материала (D-Shape);
- Selective Laser Sintering (SLS): селективное спекание – устройство плавит рабочую смесь (песок) с помощью лазера;
- Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) – торкретирование (напыление), в сопле происходит смешивание песка и клейкого состава (или подается готовый раствор), и полученная смесь напыляется на поверхность;
- Additive welding – аддитивная сварка, послойное создание металлических конструкций по технологии MIG-наплавки.

Для большей прочности конструкцию армируют в вертикальном или горизонтальном направлении. При технологии торкретирования смесь можно напылять на готовый решеточный настил или арматурную сетку, которая предварительно сварена другим строительным роботом. Для любой из перечисленных выше технологий можно применить метод многоэкструдерной/многоструйной печати для ускорения процесса постройки объекта.

По конструкции строительные 3D-принтеры делятся:

- на декартовые (XYZ-принтеры, порталные);
- D-Shape (выделяется отдельно из декартовых, ввиду особенности технологии 3DP);
- дельта;
- с полярной системой координат;
- роботы-принтеры типов «промышленный манипулятор» и SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm);
- самоходные строительные машины;
- министроители (Minibuilders) [3];
- роботы-дроны;
- роботы-гуманоиды.

В работах [4 – 7] рассматривается технология контурного строительства (Contour Crafting), ее теоретическое и практическое применение, преимущества порталных систем для крупногабаритной печати.

Декартовые принтеры признаны наиболее стабильными для строительства [8]. Отечественные исследования и практические наработки в сфере аддитивного строительства представлены в табл. 1.

Основными отрицательными факторами для применения строительных принтеров являются:

- ограниченная мобильность и заранее заданные размеры системы координат принтера;

Таблица 1

Сравнительная таблица отечественных компаний

Компания	Модели принтеров	Кинематика принтеров	Год начала работы компании	Подача смеси	Конструкционные проблемы и несовершенства
RVS-3D [9]	RVS 2.1, RVS 1.1	Портальная	2020	Вертикальный экструдер	Зависимость от погодных условий при уличной печати, ограниченная высота печати (до 3 этажей), необходимость калибровки и сложность транспортировки крупногабаритных принтеров
ЛЕПТО [10]	SCARA-принтеры	SCARA	2020	Двухшнековый горизонтальный экструдер, смешивающий сухую смесь и воду	Ограниченная площадь печати, не подходит для масштабного строительства зданий целиком, требует использования специальных смесей с мелкой фракцией
АМТ «Спец-авиа» [11]	S400	Портальная	2015	Вертикальный экструдер	Зависимость от качества бетонной смеси, сложность в настройке и эксплуатации
ApisCor [12]	Мобильные	Цилиндрическая	2015	Бетононасос	Высокая стоимость оборудования, ограниченная мобильность принтеров
StroyBot [13]	—	Портальная	2014		Ограниченная скорость печати, необходимость ручного вмешательства для армирования

– армирование и финишная обработка часто требуют участия человека, что снижает автоматизацию процесса;

– большинство принтеров не могут работать при экстремальных температурах или высокой влажности;

– экструзия большинства принтеров осуществляется напрямую от подаваемой бетононасосом смеси.

В процессе анализа технологий, конструкций, свойства материалов и их стоимости предлагается технология строительства недвижимости посредством совместного использования портальных или цилиндрических 3D-принтеров с параллельным использованием сваривающих арматуру роботов, а также выравниванием стен и отделкой с помощью торкрет-машин. Такое строительство будет дороже, чем использование только одного вида машин, однако повысит прочность здания и качество готовых объектов, сократит число отделочных работ и время строительства.

Ключевой проблемой при строительстве в Арктической зоне является ограничение температурных условий окружающей среды при использовании бетонных смесей. Чем ниже температура, тем больше времени бетон будет достигать прочности, а при температуре ниже 0 °С печать бетонными смесями становится невозможной по причине кристаллизации льда, поэтому следует не только поддерживать микроклимат в рабочей зоне, но и нагревать подаваемую смесь при укладке. Необходимо создание специального инструмента для дальнейших исследований технологии печати в арктических климатических условиях, когда температурно-влажностные показатели являются неподходящими для печати бетоном на существующих принтерах.

## Объекты и методы

Для системы строительной 3D-печати выбрана декартова кинематика (также известная как картезианская, прямоугольная, портальная), являющаяся одним из наиболее распространенных видов кинематики, используемых в 3D-принтерах. Выбор был сделан на основе требований к конструкции строительного 3D-принтера, его производства и внедрения в сферу строительства. Декартова кинематика относительно проста в реализации и управлении, использует прямые линии для перемещения экструдера, что делает управление принтером более простым для оператора. Декартова кинематика позволяет обеспечить большую область печати, чем другие виды кинематики, такие как дельта-кинематика. Это позволяет пользователю создавать более крупные объекты. Экструдеры принтеров декартовой кинематикой могут двигаться по всем трем осям с высокой точностью печати за счет линейности перемещений. Декартова кинематика позволяет запрограммировать каждую ось движения независимо, что делает ее простой в настройке.

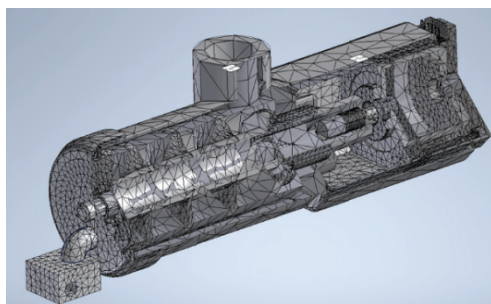
Для исследования системы управления строительной трехмерной печати спроектированы прототипы: шнекового горизонтального экструдера, опытной (лабораторной) версии 3D-принтера и производственной версии.

Так как деформации конструкции больше всего влияют на точность управления принтером и, следовательно, на качество печати, то наиболее целесообразно провести исследование влияния деформации.

Важным этапом является выбор математического и программного обеспечения системы автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования экструзионных 3D-принтеров. Оно должно позволять создавать сложные геометрические модели и обеспечивать высокую точность расчетов, что поможет избежать несоответствий при реальной печати. Данным требованиям отвечают многие САПР, такие как КОМПАС-3D, Solid Works, T-FLEX CAD, Autodesk Robot Structural Analysis Professional и др. Для проведения исследования выбраны системы автоматизированного проектирования Autodesk Fusion 360, Autodesk Inventor Professional 2020. В данных САПР имеются встроенные модули для проведения автоматизированного анализа на деформации под воздействием различных нагрузок. Стоит отметить, что на качество анализа кинематики влияет качество модели. В автоматизированном анализе поведения конструкций при воздействии на нее сил для расчета используется метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов представляет собой численный подход к решению дифференциальных уравнений, которые возникают при математическом описании поведения различных объектов в разнообразных сценариях [14]. Такие объекты включают в себя жидкости и газы в движении, высокоэластичные материалы, а также механические детали машин, подвергающиеся воздействию внешних нагрузок. С использованием МКЭ можно проводить расчеты, определяющие распределение напряжений, деформаций, скоростей, температур, электрического потенциала, вибраций и других характеристик этих объектов в процессе их эксплуатации.

Применение МКЭ требует выполнения большого объема вычислений, который невозможно осуществить без использования вычислительных мощностей компьютеров и специализированных программных систем автоматизированного проектирования. Autodesk Inventor предоставляет функциональность, характерную для САПР, и позволяет проводить расчеты напряжений и деформаций в созданных моделях деталей и сборок, а также определять частоты собственных колебаний этих объектов. В данном контексте следует рассматривать методы для расчета напряжений в деталях и сборках, подвергающихся воздействию внешних статических нагрузок. В программных продуктах Autodesk присутствует настройка выбора метода разбиения модели: метод Кунса, метод Делоне,



**Рис. 2. Внешний вид сетки, построенной методом триангуляции Делоне на тетраэдры**

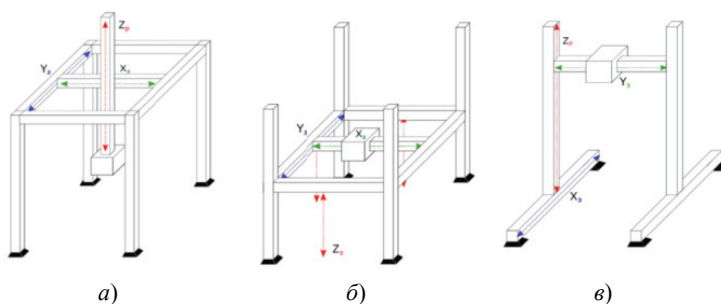
«измельчение сетки» (при выборе этого метода, вблизи концентратора сетка будет построена по методу Канга, а вне этой области – по методу Делоне). Непосредственно в Autodesk Inventor используется метод триангуляции Делоне на тетраэдры (рис. 2). Параметры сетки следующие:

- допуск 0,1 мм;
- допуск соединителя оболочки 1,8 мм;
- средний размер элементов 0,1 мм;
- минимальный размер элементов (от среднего размера) 0,2 мм;
- коэффициент разнородности 1,5;
- максимальный угол поворота  $60^\circ$ ;
- критерий останова при настройке сходимости 10 %;
- порог уточнения 0,8.

### Результаты и обсуждение

При разработке конструкции и кинематики принтера целесообразно итерационно проводить их моделирование и анализ на статические деформации. На первом шаге проводился анализ семи существующих конструкций и трех кинематических схем с неподвижным «столом» (рис. 3) [15, 16]. Схемы, приведенные на рис. 3, а, б, являются наиболее подходящими под создание строительного 3D-принтера, чем схема, показанная на рис. 3, в, так как имеют больше точек опоры, что позволяет более равномерно распределить нагрузку и предотвратить опрокидывание.

Схема (см. рис. 3, а) позволит печатать подвальные помещения, находящиеся под уровнем опоры, а также больше подходит для дополнения конструкции строительным краном, однако нагрузка на оси  $X$  и  $Y$  существенно возрастает, что приводит к искривлению осей, большему смещению экструдера и неравномерности печати слоя, поэтому для проектируемого прототипа выбрана кинематика (см. рис. 3, б).



**Рис. 3. Варианты кинематической схемы разрабатываемого 3D-принтера**



Конструкция экструдера располагается в горизонтальной плоскости в отличие от аналогов с вертикальным расположением. Данная конфигурация имеет следующие преимущества: горизонтальная ориентация упрощает управление подачей строительных смесей через шнек, поскольку исключается влияние силы тяжести на дозирование, снижая риск заторов, тем самым уменьшая количество «подтеканий» строительного материала без использования дополнительной выходной заслонки на сопле; снижение нагрузки на подшипники и другие компоненты конструкции. Горизонтальное направление подачи материала обеспечит наибольшую точность, что приведет к более качественной печати. С эксплуатационной точки зрения такой экструдер легче обслуживать, так как основные компоненты находятся на уровне рабочей зоны, что упрощает замену или очистку деталей.

В разрабатываемой системе данный горизонтальный экструдер устанавливается на подвижную систему портального типа. Однако его конструкция имеет перспективы размещения на манипуляторах, аналогично устройству для 3D-печати строительными смесями на основе вяжущих материалов с помощью робота-манипулятора KUKA [17] для печати под различными углами.

После моделирования разработанного прототипа строительного 3D-принтера в программе Autodesk Inventor Professional 2020 проведен его анализ на деформации в соответствии с программой испытаний. Для этого заданы силы, воздействующие на элементы, и параметры их материалов, такие как модуль упругости и предел прочности. Например, предел прочности ABS пластика составляет от 40 до 65 МПа, алюминия – от 140 до 290 МПа, стали – от 600 до 900 МПа.

Рассмотрим найденные эквивалентные напряжения по Мизесу (предельное напряжение), контактные давления и смещения. Напряжение по Мизесу характеризует удельную потенциальную энергию формоизменения и часто рассматривается как критерий перехода материала в стадию пластического деформирования в случае многоосного напряженного состояния. Если значение эквивалентного напряжения по Мизесу превышает предельные значения, установленные для данного материала, ожидается разрушение конструкции.

### Анализ экструдера

При анализе конструкции спроектированного шнекового экструдера найдены напряжения, испытываемые в точках конструкции. Максимальное значение (рис. 4) приходится на внутренний подшипник шагового двигателя. В остальных точках напряжение равномерно распределяется и стремится к нулю.

Максимальное абсолютное смещение увеличивается от места крепления экструдера к соплу и нагревательному элементу (рис. 5). Численные результаты представлены в табл. 2. Значение абсолютного смещения не является критичным и входит в предел погрешности. Значения максимальных напряжений относительно материалов также не несут существенной нагрузки.

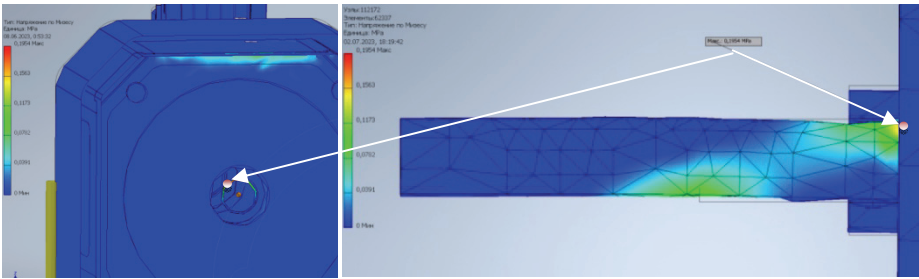


Рис. 4. Точка максимального напряжения экструдера на подшипнике



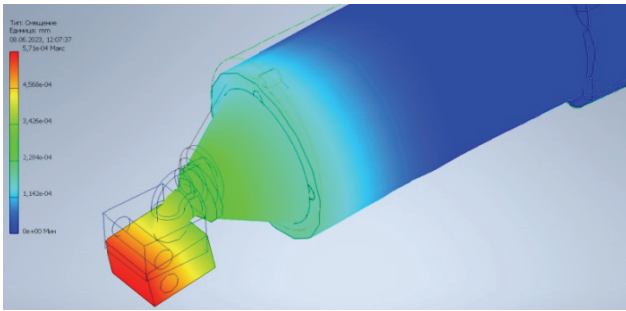


Рис. 5. Распределение абсолютного смещения

Таблица 2

Численные результаты анализа прототипа экструдера  
в зависимости от материалов

Материалы		Максимальное абсолютное смещение, мм	Напряжение на валу шагового двигателя, МПа
Корпус экструдера	Шнек		
Пластик АБС	Пластик АБС	0,00105	0,04
	Алюминий 5005	0,000571	0,1963
Алюминий 6061 Т6	Алюминий 6061 Т6	0,00008115	0,07667
Сталь нержавеющая 440С сварочная	Алюминий 5005	0,00008354	0,09456
	Сталь нержавеющая 440С сварочная	0,0000829	0,1286

Анализ прототипа опытной (лабораторной) версии 3D-принтера

Данная версия имеет рабочую площадь в 1600 см<sup>2</sup> и высоту 40 см, диаметр винта 0,8 см. Исследуемый профиль: «конструкционный профиль V20×20». Максимальное напряжение на опоре оси X происходит, когда экструдер располагается на ее середине (рис. 6). В данном случае смещение вниз под действием силы тяжести будет максимальным (рис. 7).

Минимальный коэффициент запаса прочности располагается на винтах оси Z, в остальных точках он доходит до 15 (рис. 8). Численные значения абсолютного смещения экструдера от теоретической точки, максимальные напряжения ни оси X и на стальных винтах оси Z, значение минимального запаса прочности представлены в табл. 3.

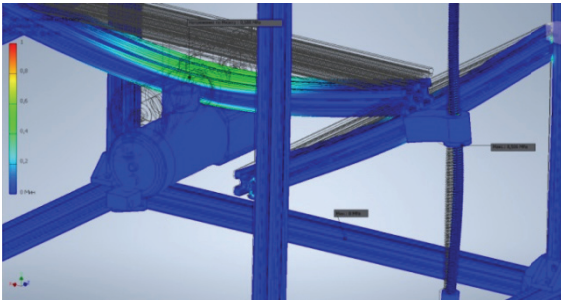


Рис. 6. Карта напряжений по Мизесу

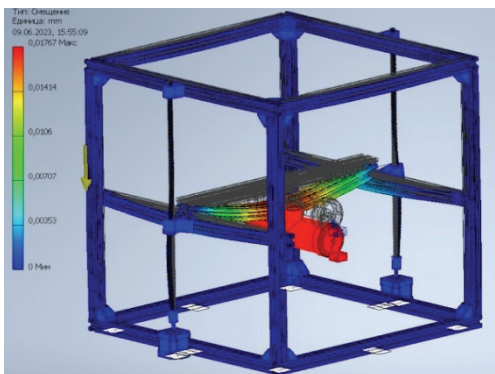


Рис. 7. Карта абсолютных смещений

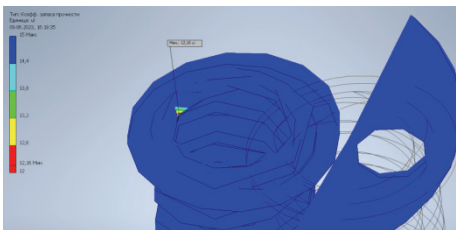


Рис. 8. Карта запаса прочности винтов

Таблица 3

**Численные результаты анализа прототипа опытной (лабораторной) версии  
в зависимости от материалов**

Материалы		Максимальное напряжение на оси X, МПа	Максимальное смещение экструдера, мм	Максимальное напряжение на винте, МПа	Минимальный коэффициент запаса прочности винта
Экструдер	Каркас				
Пластик АБС	Алюминий 6061 Т6	0,567	0,01631	7,799	13,26
1. Корпус: пластик АБС 2. Шнек: алюминий 5005		0,588	0,0173	8,506	12,16
Алюминий 6061 Т6		0,58	0,01849	14,29	7,4
Сталь нержа- вующая 440С сварочная		0,96	0,03086	16,79	6,3
Алюминий 6061 Т6	Сталь нержавеющая 440С сварочная	0,891	0,01022	7,222	Выше 15
Сталь нержа- вующая 440С сварочная		1,35	0,01624	10,83	

### Анализ прототипа производственной версии

Отмасштабируем исходную конструкцию каркаса. Данная версия имеет рабочую площадь в 160 000 см<sup>2</sup> и высоту 400 см, диаметр винта 8 см. Максимальное напряжение на опоре оси X происходит, когда экструдер располагается на ее середине. В данном случае смещение вниз под действием силы тяжести будет максимальным (рис. 9). Численные значения абсолютного смещения экструдера от теоретической точки, максимальные напряжения на оси X и на стальных винтах оси Z, значение минимального запаса прочности представлены в табл. 4.

Получив результаты анализа модели на статические деформации, сравним полученные данные с физико-механическими свойствами материалов конструкции. Различные методики оценивают минимальный запас прочности стального резьбового элемента, зависящего от диаметра и испытываемых нагрузок, по-разному. Значения минимального запаса прочности, рассчитанные по методикам, меньше полученных экспериментально, что допустимо.

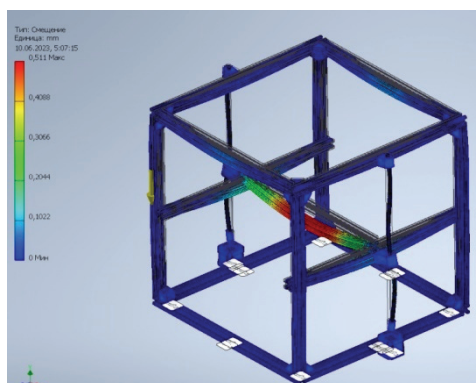


Рис. 9. Карта абсолютных смещений увеличенной модели

Таблица 4

**Численные результаты анализа прототипа производственной версии  
в зависимости от материалов**

Материалы		Максимальное напряжение на оси X, МПа	Максимальное смещение экструдера, мм	Максимальное напряжение на винте, МПа	Минимальный коэффициент запаса прочности винта
Экструдер	Каркас				
Алюминий 6061 T6	Алюминий 6061 T6	1,401	0,4891	5,711	9,63
Сталь нержавеющая 440С сварочная		1,412	0,4896	5,709	9,63
Алюминий 6061 T6	Сталь нержавеющая 440С сварочная	4,02	0,467	17,13	Выше 15
Сталь нержавеющая 440С сварочная		4,03	0,4686	17,15	

Интерпретация результатов моделирования показывает, что реализация модели на практике позволит создать прочную и масштабируемую конструкцию строительного 3D-принтера. Алюминиевый каркас сохраняет приемлемые напряжения (1,4 МПа) при масштабировании, но смещение экструдера (~0,5 мм) может быть критичным для точности печати, однако для масштабов строительства незначительно. Стальной каркас снижает смещение на 4 %, но вызывает трехкратный рост напряжений на оси X и винтах, что недопустимо для крупногабаритных систем. Таким образом, масштабируемость конструкции нуждается в усовершенствовании. Конструкция несущих профилей может быть облегчена, но при этом дополнена ребрами жесткости и дополнительно может быть проработана их телескопичность.

Учитывая коэффициент теплового расширения алюминия, при нагреве экструдера возможны дополнительные смещения, компенсация которых также включена в систему позиционирования.

Оценим конструкцию с точки зрения значимости строительства в Арктической зоне. Ранее было сказано, что для печати необходимо обеспечить поддержание температуры. На формирующей головке экструдера размещаются нагреватель-

ный элемент и датчик температуры. При печати, перед попаданием на шнек, бетон предварительно нагревается в диапазоне 30...35 °С. В точке экструзии температура бетона должна составлять 60...85 °С [18] для укладываемости строительной смеси. Конструкция каркаса не только обеспечивает жесткость, но и позволяет создать в рабочей зоне термокамеру, в которой будет поддерживаться повышенная температура для ускорения набора прочности бетона. Исходя из кривых нагрева, по предварительным расчетам, при температуре выше 60 °С время набора 100 % прочности бетоном для одного готового одноэтажного объекта или элемента составляет от одного до двух дней.

### Заключение

Разработанный прототип строительного 3D-принтера планируется применить как лабораторный стенд для обучения операторов устройства, а также для проведения испытаний по печати новыми разрабатываемыми строительными смесями, такими как, например, полимерно-песчаный композит. Исследование выявило критически важные элементы конструкции. Учет значений абсолютных отклонений от заданных значений координат в системе числового программного управления позволит повысить точность позиционирования. Для решения проблемы нагруженности винтов предлагается ввести дополнительную подсистему фиксаций на уровне текущего слоя.

*Исследование выполнено в рамках инициативной НИОКР № 124041100082-5.*

### Список литературы

1. Кулёмин, В. В. Разработка универсального устройства управления производственными механизмами с беспроводной передачей данных / В. В. Кулёмин, В. В. Ерещенко // Наука и образование – 2021 : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 1 декабря 2021 г. – Мурманск, 2022. – С. 57 – 62.
2. Кулемин, В. В. Разработка структуры системы беспроводного числового программного управления строительным 3D-принтером / В. В. Кулемин, А. В. Кайченев, А. В. Столянов // Наука и инновации в Арктике : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Мурманск, 04 – 09 декабря 2023 г. – Мурманск, 2024. – С. 20 – 22.
3. MiniBuilders: Small Robots for Large Structures // Automate Construction. – 2020. – URL : <https://robots.iaac.net/> (дата обращения: 15.10.2023).
4. Computer Vision for Real-Time Extrusion Quality Monitoring and Control in Robotic Construction / A. Kazemian, X. Yuan, O. Davtalab, B. Khoshnevis // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 101. – P. 92 – 98. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.022
5. Khoshnevis, B. Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials / B. Khoshnevis, R. Dutton // Materials Technology. – 1998. – Vol. 13, No. 2. – P. 53 – 56. doi: 10.1080/10667857.1998.11752766
6. Zareian, B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete / B. Zareian, B. Khoshnevis // Automation in Construction. – 2017. – Vol. 83. – P. 212 – 221. doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.019
7. Zareian, B. Effects of mixture ingredients on interlayer adhesion of concrete in Contour Crafting / B. Zareian, B. Khoshnevis // Rapid Prototyping Journal. – 2018. – Vol. 24, No. 2. – P. 584 – 592. doi: 10.1108/RPJ-02-2017-0029

8. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112(C). – P. 37 – 49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
9. RVS-3D: Технологии 3D-печати в строительстве // RVS-3D. – URL : <https://rvs3d.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
10. ЛЕРТО: Роботизированные системы для строительства // ЛЕРТО. – URL : <https://lerto.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
11. Спецавиа: Профессиональные 3D принтеры для строительства и промышленности от «АМТ» // Спецавиа. – URL : <https://specavia.pro/> (дата обращения: 15.10.2023).
12. Apis Cor.: Construction with Robotics Precision // Apis Cor. – URL : <https://apis-cor.com/> (дата обращения: 15.10.2023).
13. StroyBot. 3D строительный принтер. Crowdfunding в России // 3Dtoday. – URL : <https://3dtoday.ru/blogs/andreyr/stroybot-3d-construction-of-the-printer-crowdfunding-in-russia> (дата обращения: 15.10.2023).
14. Балакин, А. И. Исследование воздействия нагрузок на деталь с использованием метода конечных элементов / А. И. Балакин, Н. А. Балакина // *Аллея науки*. – 2017. – Т. 2, № 16. – С. 810 – 815.
15. Копец, Е. Е. Математическое и программное обеспечение подсистемы эскизного проектирования САПР экструзионных 3D-принтеров : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Копец Екатерина Евгеньевна. – Санкт-Петербург, 2022. – 188 с.
16. Копец, Е. Е. Математическое и программное обеспечение подсистемы эскизного проектирования САПР экструзионных 3D-принтеров : автореф. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Е. Е. Копец. – Санкт-Петербург, 2022. – 20 с.
17. Патент № 209751, Российская Федерация, В29С 48/78 (2022.01). Устройство для 3D-печати на основе вяжущих : № 2021132749 : заявл. 10.11.2021 : опубл. 22.03.2022, бюл. № 9 / Тихонов А. А., Любимый Н. С., Польшин А. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».
18. Р-НП СРО ССК-02-2015. Рекомендации по производству бетонных работ в зимний период. – Челябинск : Некоммерческое партнерство саморегулируемая организация «Союз строительных компаний Урала и Сибири», 2015. – 84 с.

---

## Development of a Prototype Design for Construction of 3D Printer

V. V. Kulyomin✉, A. V. Kaychenov

*Department of Automation and Computer Engineering,  
Murmansk State Technical University, [cul3min@yandex.ru](mailto:cul3min@yandex.ru); Murmansk, Russia*

**Keywords:** automation of construction processes; arctic construction; deformation analysis; finite element method; low-temperature conditions; construction 3D printing; heat chamber; numerical control; screw extruder.

**Abstract:** The article focuses on the development and research of a prototype construction 3D printer adapted for Arctic regions of Russia. The study emphasizes the mechanical part of the printer, analyzed using Autodesk Inventor Professional 2020, including simulations of deformations, von Mises stresses, contact pressures, and displacements. Results demonstrate that the selected Cartesian kinematics and horizontal screw extruder ensure printing stability under loads, with a minimum safety factor of 7.4 for the aluminum frame. Special attention is given to solving low-

temperature concrete extrusion challenges, such as preheating the mixture to 60–85 °C and implementing a thermal chamber to accelerate strength development. The developed prototype could automate construction in the Far North, reducing housing construction time and manual labor.

### References

1. Kulomin V.V., Yereshchenko V.V., *Nauka i obrazovaniye - 2021: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and Education - 2021: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference], Murmansk, 01 December 2021, Murmansk, 2022, pp. 57-62. (In Russ.)
2. Kulemin V.V., Kaychenov A.V., Stolyanov A.V. *Nauka i innovatsii v Arktike: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Science and Innovation in the Arctic: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], Murmansk, 04-09 December 2023, Murmansk, 2024, pp. 20-22. (In Russ.)
3. MiniBuilders: Small Robots for Large Structures, *Automate Construction*, 2020, available at: <https://robots.iaac.net/> (accessed 15 October 2023).
4. Kazemian A., Yuan X., Davtalab O., Khoshnevis B. Computer Vision for Real-Time Extrusion Quality Monitoring and Control in Robotic Construction, *Automation in Construction*, 2019, vol. 101, pp. 92-98. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.022
5. Khoshnevis B., Dutton R. Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials, *Materials Technology*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 53-56. doi: 10.1080/10667857.1998.11752766
6. Zareian B., Khoshnevis B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete, *Automation in Construction*, 2017, vol. 83, pp. 212-221. doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.019
7. Zareian B., Khoshnevis B. Effects of mixture ingredients on interlayer adhesion of concrete in Contour Crafting, *Rapid Prototyping Journal*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 584-592. doi: 10.1108/RPJ-02-2017-0029
8. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 112(C), pp. 37-49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
9. available at: <https://rvs3d.ru/> (accessed 15 October 2023).
10. available at: <https://lerto.ru/> (accessed 15 October 2023).
11. available at: <https://specavia.pro/> (accessed 15 October 2023).
12. available at: <https://apis-cor.com/> (accessed 15 October 2023).
13. available at: <https://3dtoday.ru/blogs/andreyr/stroybot-3d-construction-of-the-printer-crowdfunding-in-russia> (accessed 15 October 2023).
14. Balakin A.I., Balakina N.A. [Study of the impact of loads on a part using the finite element method], *Alleya nauki* [Alley of Science], 2017, vol. 2, no. 16, pp. 810-815. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Kopets Ye.Ye. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, St. Petersburg, 2022, 188 p. (In Russ.)
16. Kopets Ye.Ye. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, St. Petersburg, 2022, 20 p. (In Russ.)
17. Tikhonov A.A., Lyubimyy N.S., Pol'shin A.A. *Ustroystvo dlya 3D-pechati na osnove vyazhushchikh* [Device for 3D printing based on binders], Russian Federation, 2022, Pat. 209751 (In Russ.)
18. R-NP SRO SSK-02-2015. *Rekomendatsii po proizvodstvu betonnykh rabot v zimniy period* [Recommendations for concrete work in winter], Chelyabinsk: Nekommercheskoye partnerstvo samoreguliruyemaya organizatsiya "Soyuz stroitel'nykh kompaniy Urala i Sibiri", 2015, 84 p. (In Russ.)



## Entwicklung des Prototypentwurfs des Bau-3D-Druckers

**Zusammenfassung:** Es ist das Design des Prototyps eines 3D-Druckers, der für den Einsatz in den arktischen Regionen Russlands geeignet ist, entwickelt und untersucht. Der mechanische Teil des Druckers ist mit Autodesk Inventor Professional 2020 analysiert, einschließlich Modellierung von Verformungen, Hintergrundspannungen, Kontaktdrücken und Versätzen. Es ist gezeigt, dass die gewählte kartesische Kinematik und der horizontale Schneckenextruder die Druckstabilität unter Belastung mit einem minimalen Sicherheitsfaktor von 7,4 für den Aluminiumrahmen gewährleisten. Der Schwerpunkt liegt auf der Lösung von Problemen bei der Tieftemperaturextrusion von Beton, einschließlich der Vorwärmung der Mischung auf 60–85 °C, und der Schaffung einer Wärmekammer zur Beschleunigung des Festigkeitssatzes.

---

## Développement de la conception du prototype de l'imprimante 3D

**Résumé:** Est élaborée et étudiée la conception d'un prototype de l'imprimante 3D adaptée aux régions arctiques de la Russie. Autodesk Inventor Professional 2020 a analysé la partie mécanique de l'imprimante, notamment en modélisant les déformations, les contraintes de von mises, les pressions de contact et les décalages. Est démontré que la cinématique cartésienne sélectionnée et l'extrudeuse à vis horizontale assurent la stabilité de l'impression sous charge, avec un facteur de sécurité minimal de 7,4 pour le cadre en aluminium. L'accent est mis sur la résolution des problèmes liés à l'extrusion à basse température du béton, y compris le préchauffage du mélange à 60–85 °C et la création d'une chambre thermique pour accélérer le gain de résistance.

---

**Авторы:** *Кулёмин Василий Викторович* – инженер-программист кафедры автоматизации и вычислительной техники; *Кайченков Александр Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники, ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия.



## ВЛИЯНИЕ СВЯЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТИРОВАННОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

И. Н. Шубин✉

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,  
i.shubin77@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** активированный углеродный материал; компактирование; пористость; связующие компоненты; удельная поверхность.

**Аннотация:** Проведена высокотемпературная щелочная активация углеродного материала в инертной среде, его компактирование с использованием различных связующих материалов – поливинилового спирта, поливинилацетата и базальтового волокна. Исследованы физико-структурные характеристики компактированного активированного углеродного материала полученных ранее экспериментальных образцов, а именно удельная поверхность и пористость (общий объем пор и их размер) методом БЭТ и однородность распределения компонентов экспериментальных образцов методом синхронного термического анализа (ТГ- и ДСК-анализом). Представлены результаты исследований. Установлены неравномерность распределения и нелинейное влияние связующих компонентов на физико-структурные характеристики исследованных компактированных активированных углеродных материалов по их объему.

---

### Введение

Определение физико-структурных характеристик – одно из приоритетных направлений при разработке новых многофункциональных материалов, поскольку лишь их знание позволяет реализовать весь имеющийся потенциал данных материалов в полном объеме. К таким материалам принято относить активированные углеродные материалы, обработка которых различными активаторами (из которых наиболее часто используют кислоты, щелочи, водяной пар, их комбинации и т.д.) радикально меняет целый ряд ключевых и востребованных характеристик [1 – 4]. К ним можно отнести удельную поверхность, объем пор и их размер и другие, то есть характеристики, наиболее востребованные в химической и нефтегазовой отраслях, медицине, радиоэлектронике, сельском хозяйстве, энергетике и пр. [5].

При этом, как отмечают многие авторы, одним из наиболее эффективных и доступных вариантов получения активированных углеродных материалов является высокотемпературная щелочная активация специально подготовленного углеродного сырья – углеродных наноматериалов, фенолформальдегидной смолы, природных углей, декстрина, древесных отходов, графена, в инертной среде [6 – 10].

Однако на практике наиболее часто проводится характеристика лишь отдельных свойств функциональных материалов или режимных параметров их получения, влияющих на характеристики данных материалов, причем результаты исследований различных авторов, как правило, не увязываются с другими. Присутствует слабая привязка к промышленному производству и условиям реального применения. Например, многими авторами проводились исследования, направленные на определение наиболее рациональной температуры процесса активации, – при температуре 300...500 °C [11]; 600...800 °C [12], 700...900 °C [13], 750 °C [14, 15], 800...900 °C [16 – 19].

Продолжительность процесса активации (от 1,5 до 3 ч) рассматривалась в работах [6, 20, 21], причем были установлены наиболее эффективные режимные параметры для определенного типа исходного сырья и его соотношения с активатором.

Авторы целого ряда работ [21 – 24] анализировали рациональность использования различных активирующих компонентов (NaOH, KOH, KНСО<sub>3</sub> и K<sub>2</sub>СО<sub>3</sub>) для получения наиболее высокой удельной поверхности и пористости углеродного материала, а также влияние различных инертных газов (He, Ar и N<sub>2</sub>) на процесс активации, отмечая при этом рациональность использования в данном процессе именно KOH и N<sub>2</sub>.

В исследованиях [25 – 28] установлен положительный эффект от одновременного применения нескольких активаторов (например KOH + H<sub>2</sub>O) при протекании процесса активации. В результате выявлена возможность снижения температуры процесса активации без ухудшения характеристик активируемого углеродного материала, что является важным режимным параметром при возможной практической реализации данного процесса.

В условиях реального применения, активированные углеродные материалы используются в различной форме: в виде порошка, гранул, волокон, для поглощения, разделения или очистки, а также в качестве носителей катализаторов и лекарственных средств, топливных ячеек и т.д. Однако при этом к ним дополнительно предъявляются высокие требования по возможности формования и связующим – для удобства дальнейшего использования в готовых изделиях и повышения их сорбционных характеристик [3, 5, 29 – 34].

Так, одной из актуальных прикладных задач является всестороннее исследование влияния связующего компонента, используемого для получения компактированных образцов, на итоговые характеристики компактированного активированного углеродного материала. При этом обычно делается ряд допущений, согласно которым:

- связующий компонент равномерно распределяется по объему основного (углеродного) материала;
- физико-структурные характеристики исследуемого компактированного образца (блочка, черенка или гранулы) одинаковы в любой его точке.

Комплексное направление исследований физико-структурных свойств, являясь по сути малоизученным, представляется весьма интересным и перспективным как с практической точки зрения (возможность промышленной реализации процесса), так и с точки зрения фундаментальных исследований. Актуальность подобных работ и поставленных вопросов, по мнению автора, предполагает проведение нескольких связанных, но независимых направлений исследований.

*Цель работы* – исследование распределения связующего компонента и его влияние на физико-структурные характеристики компактированного активированного углеродного материала.

## Объекты и методы исследования

Проведенные экспериментальные исследования состояли из двух этапов, включающих несколько стадий.

1. *Методика получения экспериментальных образцов активированного и компактированного углеродных материалов.* На данном этапе осуществлялась подготовка исследуемых образцов на следующих стадиях:

– *высокотемпературная активация углеродного материала*, проводящаяся при температуре 400...750 °С в течение 120 мин (основная стадия) в инертной среде (активируемая реакционная смесь – карбонизат на основе декстрина и гидроксида калия в соотношении 1 : 3) [6, 28];

– *компактирование активированного углеродного материала со связующим компонентом*, заключающееся в получении формованных образцов в виде блочков с применением связующих: поливинилового спирта (**ПВС**) ГОСТ 10779–78, поливинилацетата (**ПВА**) ТУ 2242-011-39778023–2015, базальтового волокна (**БВ**) ТУ 5952-036-05328981–2006 в количестве 20 %, и предполагающее ступенчатый нагрев при температуре 75...190 °С, прессование при давлении 1,5...7,5 кН и выдержку в течение 3...210 мин с последующим охлаждением и сушкой [33, 35].

Связующие компоненты вносились в активированный углеродный материал (в виде раствора для ПВА и ПВС, волокна размером  $(3...6 \pm 1,5)$  мм, диаметром  $(9 \pm 1,5)$  мкм для БВ) и перемешивались в механическом диспергаторе до однородного состава.

Выбор количества связующего и режимных параметров прессования продиктован получением устойчивых от разрушения образцов и возможностью последующего корректного сравнения результатов, а самих связующих – их инертностью, доступностью и слабой активностью по отношению к активированному углеродному материалу (то есть при использовании данных связующих пористая структура активированного углеродного материала остается максимально доступной). При этом получены блочки массой 17...18, 26...27 и 31...32 г со связующими ПВС, БВ и ПВА соответственно. Различие в массе образцов обусловлено технологией их получения [32];

– *подготовка экспериментальных образцов*, включающая разрезание полученных на предыдущей стадии блочков и отбор проб согласно схеме, показанной на рис. 1. Выбор места отбора проб (точки Т1 – Т4) продиктован желанием проследить возможное изменение физико-структурных характеристик компактированного активированного углеродного материала по всему объему полученного блочка и однородность его состава. В свою очередь каждой из точек (Т1 – Т4) соответствовало усредненное значение по результатам анализа нескольких блочков (в работе анализировались партии по 4 блочка с каждым из связующих компонентов). В результате получены следующие экспериментальные образцы:

– точки Т1 и Т2 – пробы из внутреннего объема блочка;

– точки Т3 и Т4 – пробы с внешней поверхности блочка, цилиндрической и торцевой соответственно.

2. *Диагностика экспериментальных образцов.* Данный этап исследований включал две стадии:

– *определение физико-структурных характеристик* – пористости (общего объема пор и их размера) и удельной поверхности, с помощью аналитического комплекса Altamira Instruments Top 200 (США) по типовой методике с использованием метода анализа по БЭТ;

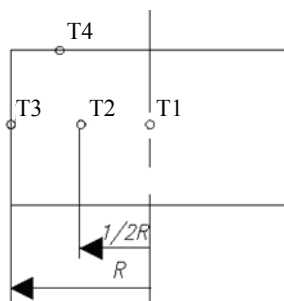


Рис. 1. Схема отбора проб из экспериментальных образцов

– *определение состава экспериментальных образцов и однородности распределения входящих в них компонентов* – с помощью синхронного термического анализа на дериватографе STA 449 F3 Jupiter (NETZSCH Feinmahltechnik, GmbH, Selb, Германия) по типовой методике (скорость нагрева 10 °C/мин, диапазон измерения образцов 40...900 °C, атмосфера – воздух).

### Результаты исследования и обсуждение

В результате проведенных экспериментов по определению физико-структурных параметров компактированного активированного углеродного материала получены значения пористости и удельной поверхности, представленные на рис. 2. Следует отметить, что в качестве результатов исследований представлены усредненные значения, полученные по нескольким экспериментальным образцам.

Проанализируем полученные результаты определения удельной поверхности (см. рис. 2, а):

- для компактированного с использованием связующего ПВС активированного углеродного материала – наблюдается 1,5-кратное снижение удельной поверхности от внутренней части блока к его периферии, что может быть результатом концентрации связующего компонента на внешней поверхности (выдавливание в результате прессования на периферию);

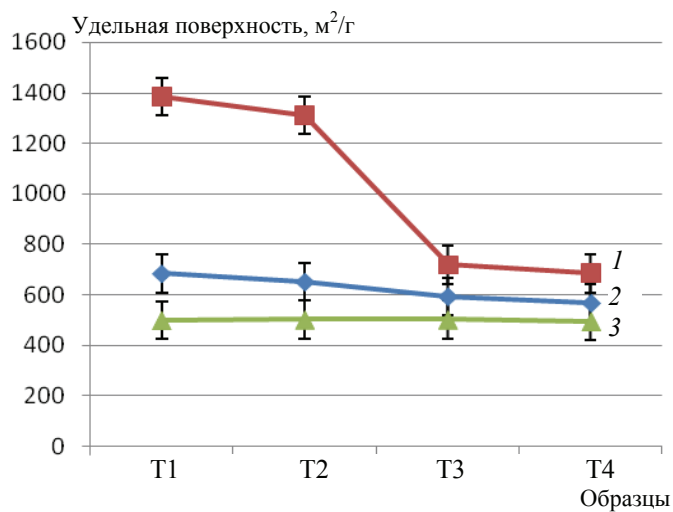
- для материала с ПВА – незначительное снижение удельной поверхности от внутренней части блока к периферии, что может свидетельствовать о более равномерном распределении связующего компонента или наличии эффективных транспортных пор. При этом по сравнению с ПВС удельная поверхность внутренней части блока в два раза ниже и становится сравнимой (несколько ниже) на периферии;

- при использовании БВ удельная поверхность практически стабильна по всему объему блока, что может говорить о равномерной транспортной доступности (и соответственно распределении связующего компонента) при применении базальтового волокна.

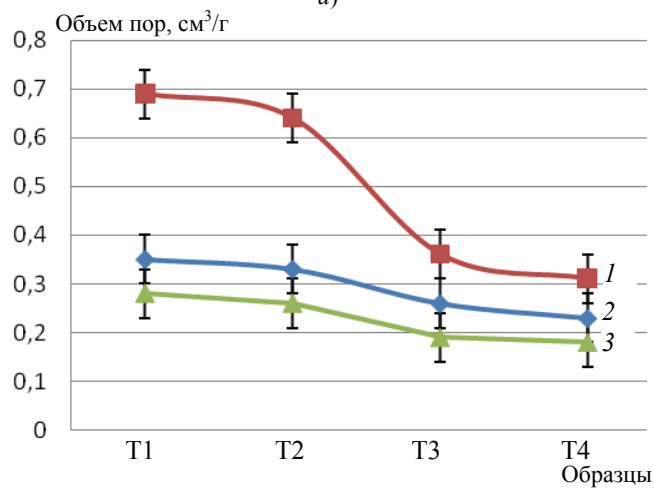
При анализе объема пор (см. рис. 2, а, б) по образцу с ПВС наблюдается аналогичная (удельной поверхности) картина со снижением пористости в 1,5 – 2 раза от внутренней части блока к его периферии, и в качестве причины можно предположить накопление связующего компонента в порах активированного материала по его периферии, что подтверждается снижением объема пор и удельной поверхности. Для образцов со связующими ПВА и БВ картина в целом напоминает ситуацию с ПВС – падение пористости от внутренней части блока к его периферии примерно на треть, но менее выраженное. Но при этом пористость компактированного активированного углеродного материала как с использованием ПВА, так и БВ, в 1,3 – 2 раза ниже, чем при применении ПВС.

Рассматривая значения размера пор исследованных образцов (см. рис. 2, в), отметим общую картину для связующих ПВА и БВ – снижение размера от центра блока к его периферии, но при этом для ПВС размер пор практически стабилен по всему объему образцов. Это вносит некоторую неоднозначность и противоречивость в полученные значения. В общем, можно сказать, что наблюдается относительная «стабильность» размера пор (вывод на основе довольно небольшого диапазона значений) независимо от используемого связующего компонента и места отбора пробы. Однако наличие влияния на пористость исследованных образцов связующего или режимных параметров процесса компактирования нельзя исключать.

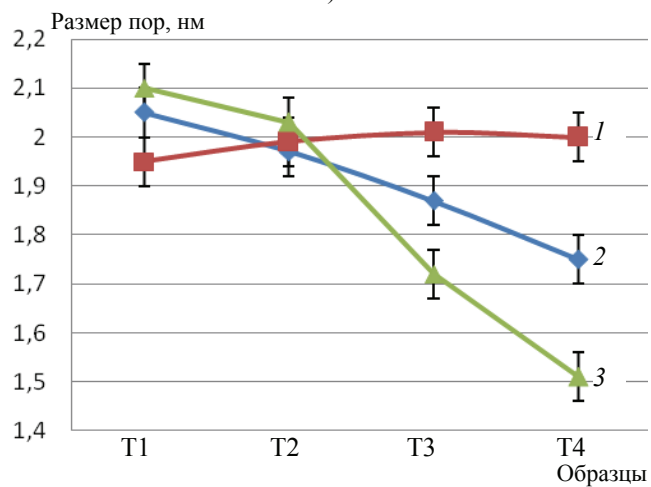
Заметная разница в характеристиках материалов со связующими ПВА и ПВС (несмотря на общее подобие связующих компонентов и метод их внесения в углеродный материал) может быть вызвана, по мнению автора, целым рядом причин или их совокупностью: различиями в технологии приготовления компактированных



a)



б)

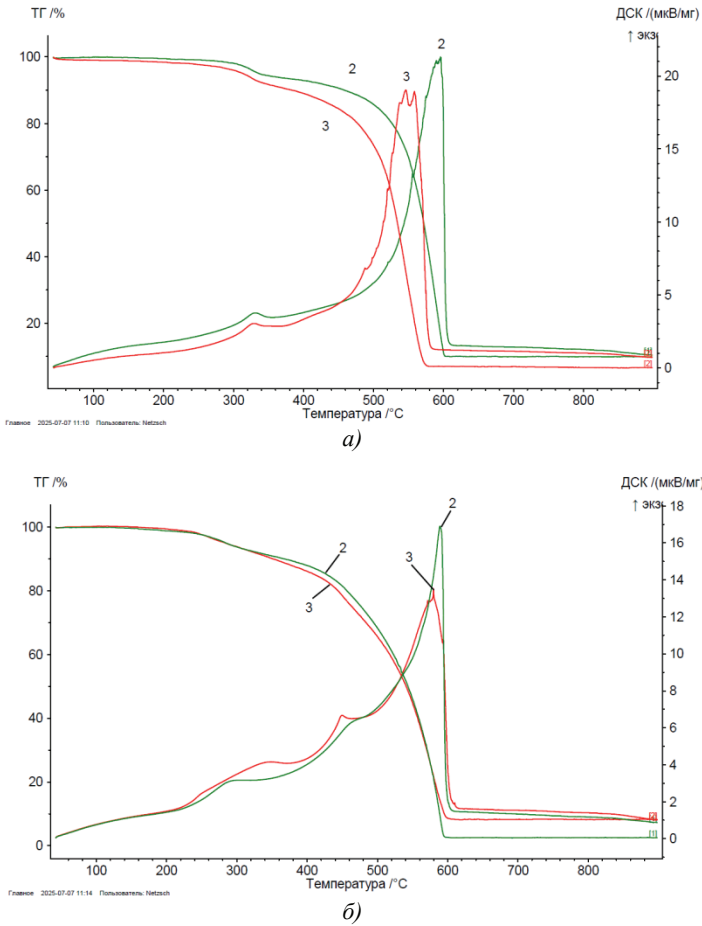


в)

**Рис. 2. Значения удельной поверхности (a), объема (б) и размера (в) пор исследованных образцов: 1 – ПВС; 2 – ПВА; 3 – БВ**

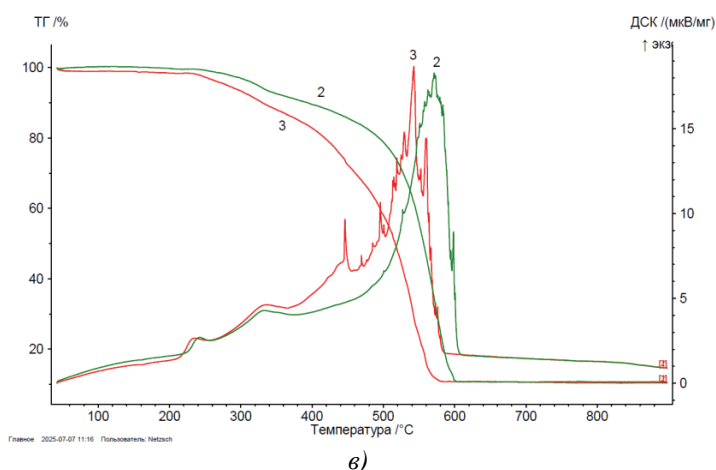
материалов, свойствами самих связующих или не до конца понятной природы распределения данных компонентов по объему активированного углеродного материала при прессовании, что в свою очередь предполагает проведение дополнительных исследований.

Рассматривая результаты, полученные с помощью синхронного термического анализа, можно сделать следующие выводы: при использовании в качестве связующего ПВС отмечается его ярко выраженное неравномерное распределение (смещение от центральной части к периферии), что подтверждается предварительными исследованиями удельной поверхности и пористости, то есть смещение кривых ТГ – ДСК в левую сторону (больше связующего – более выраженная и ранняя деградация материала). В то же время для связующих ПВА и БВ характерно их более равномерное распределение по объему исследованных образцов, с небольшим смещением его количества также к периферии (что в целом подтверждается результатами анализа) (рис. 3). При этом наличие нескольких пиков на ДСК кривых (материалы со связующими ПВА и ПВС) можно объяснить синергитическим эффектом от количества связующего и обработки материала давлением, проявляющимся применительно к скомпактированному материалу.



**Рис. 3. Результаты синхронного термического анализа при использовании связующего (начало):**

*а* – ПВА; *б* – ПВС (показаны примеры результатов анализа (по одному образцу) для проб с внутренней и наружной поверхности блочка (соответственно точки Т2 и Т3))

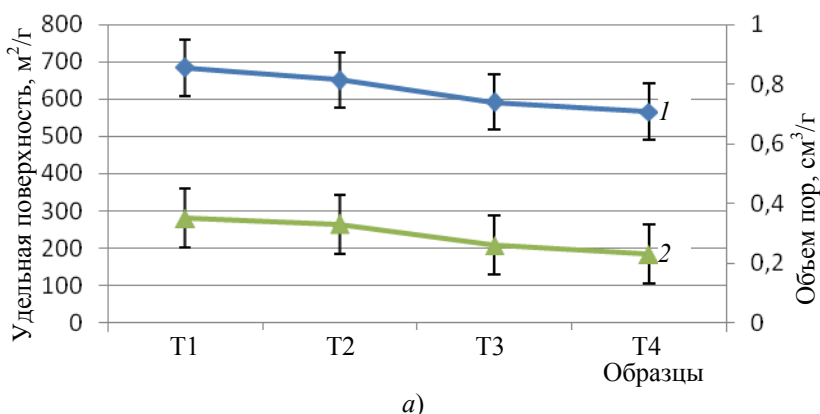


**Рис. 3. Окончание: в – БВ**

Тогда как подобный эффект для материала со связующим БВ можно отнести к последствиям компактирования, причем неравномерного по объему образца и более высокой термостабильностью. При этом анализируя температуру деструкции и фазовые переходы, можно выделить несколько участков, подобных для проб, с внутренней и внешней частями образцов, что объясняется природой взаимодействия углеродного материала со связующим при приложении давления (компактировании). Однако уточнение подобных эффектов, скорее всего, требует проведение дополнительных исследований.

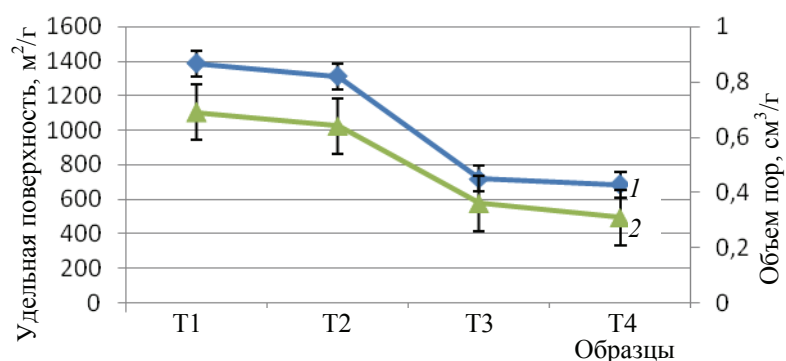
Это еще более заметно при проведении корреляции полученных значений по параметрам удельной поверхности и пористости отдельно по каждому из использованных связующих (рис. 4).

Полученные результаты сравним с результатами ранее проведенных исследований по определению физико-структурных характеристик исходного активированного углеродного материала (табл. 1) и параметрами типовых промышленных активированных углей [5, 6, 31, 35, 36].

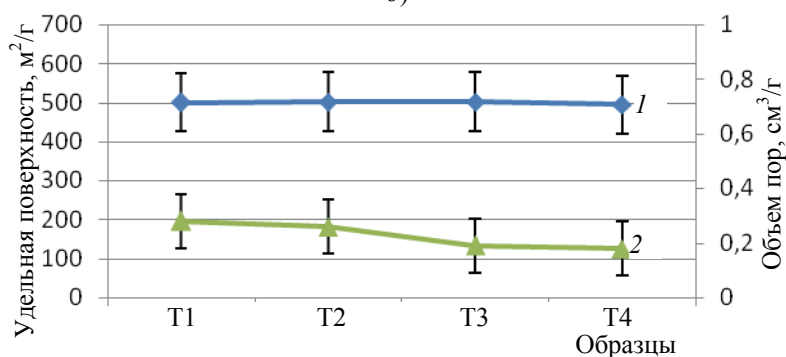


**Рис. 4. Значения физико-структурных характеристик исследованных образцов при использовании связующего ПВА (а) (начало):**  
 1 – удельная поверхность, 2 – объем пор





б)



в)

Рис. 4. Окончание: ПВС (б), БВ (в):  
1 – удельная поверхность, 2 – объем пор

Таблица 1

**Физико-структурные характеристики активированного  
и компактированного с различными связующими  
активированного углеродного материала**

Материал	Удельная поверхность, м²/г	Общий объем пор, см³/г
Промышленные активированные угли <sup>1</sup>	600...2000	0,5...1,2
Исходный активированный углеродный материал <sup>2</sup>	2700	1,25
Компактированный активированный углеродный материал:		
ПВА <sup>3</sup>	570...735	0,21...0,35
ПВС <sup>3</sup>	685...1390	0,31...0,7
БВ <sup>3</sup>	481...532	0,17...0,29

Примечание: 1, 2, 3 – усредненные значения соответственно по типовым маркам промышленных активированных углей, для активированного углеродного материала и по объему образца для компактированного с различными связующими активированного углеродного материала.

Из представленных данных очевидно, что у компактированного с различными связующими активированного углеродного материала отмечается значительное снижение характеристик по удельной поверхности в 2 – 5 и 2 – 6 раз, по объему пор в 1,5 – 4 и 1,5 – 6 раз по отношению к активированному углеродному материалу и промышленным угольным сорбентам соответственно.

Рассматривая размер пор исследованных образцов, компактированный материал можно отнести к микропористому: с диаметром пор 1,51...2,07 нм, 1,87 нм и до 3,2 нм для полученного компактированного с различными связующими углеродного материала, активированного углеродного материала и промышленных активированных углей (микропористый диапазон) соответственно.

При этом в целом ряде работ отмечается значительная сорбционная активность компактированных активированных углеродных материалов как по органическим, так и неорганическим загрязнителям, превышающая показатели типовых промышленных углей [30, 36].

Рассматривая причины снижения характеристик, а часть их очевидна и понятна (воздействие давления на активированный углеродный материал при компактировании, использование связующих, являющихся, по сути, балластом), полученные результаты являются во многом интересными, несмотря на противоречия. В связи с этим предполагается проведение на следующих этапах дополнительных исследований, которые позволят ответить на целый ряд вопросов, например: какова причина и природа неравномерного распределения связующего компонента по объему блока (избыток связующего, не оптимальность его количества или режимных параметров)? Каково влияние количества связующего на характеристики компактированного материала, например на транспортную доступность пор? Что оказывает большее влияние на параметры активированного углеродного материала при компактировании – связующее или режимные параметры? Изменяется ли сорбционная активность по объему компактированного образца? Каковы механизмы и особенности процесса сорбции, одинаковы ли они по всему объему образца (блока)? Какие методики диагностики будут являться наиболее корректными при исследовании подобных материалов?

### Заключение

Проведенные исследования физико-структурных характеристик компактированного активированного углеродного материала, полученного в результате высокотемпературной щелочной активации и последующего компактирования с использованием связующих (поливинилового спирта, поливинилацетата и базальтового волокна) позволили экспериментально определить параметры удельной поверхности и пористости (685...1390, 570...735, 483...532 м<sup>2</sup>/г; 0,31...0,7, 0,21...0,35, 0,17...0,29 см<sup>3</sup>/г; 1,94...2,03, 1,75...2,05, 1,51...2,07 нм) для материалов с ПВС, ПВА и БВ соответственно.

В свою очередь синхронный термический анализ отчасти подтвердил неоднородность состава компактированных образцов по их объему (для ПВС), что хорошо коррелируется со снижением удельной поверхности и пористости исследованных образцов от центральной части к периферии, а также показал более сложную природу взаимодействия связующих ПВА и БВ с активированным углеродным материалом при компактировании.

Однако несмотря на некоторую спорность полученных результатов, работа может послужить отправной точкой для проведения подобных исследований другими авторами, для уточнения отдельных характеристик компактированного активированного углеродного материала и ответа на поставленные в ходе проведения данного исследования вопросы.

### *Список литературы*

1. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев. – Москва : Спектр, 2013. – 152 с.
2. Hydrogen Storage in Carbon Nanostructures / M. Hirscher, M. Becher, M. Haluska, A. Quintel [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – No. 330–332. – P. 654 – 658. doi:10.1016/S0925-8388(01)01643-7
3. Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологического производства / В. Ф. Олонцев, Е. А. Фарберова, А. А. Минькова [и др.] // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. – 2015. – № 4. – С. 9 – 23.
4. Popova, A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // *Advanced Materials and Technologies*. – 2020. – № 3(19). – P. 28 – 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
5. Фенелонов, В. Б. Пористый углерод / В. Б. Фенелонов. – Новосибирск : Институт катализа СО РАН, 1995. – 518 с.
6. Попова, А. А. Исследование технологических параметров активации, влияющих на характеристики нанопористого углеродного материала / И. Н. Шубин // *Материаловедение*. – 2022. – № 11. – С. 3 – 8. doi: 10.31044/1684-579X-2022-0-11-3-8
7. Preparation of activated carbons from cork waste by chemical activation with KOH / A. P. Carvalho, B. Cardoso, J. Pires, M. B. Carvalho // *Carbon*. – 2003. – Vol. 41, No. 14. – P. 2873 – 2876. doi: 10.1016/S0008-6223(03)00323-3
8. Preparation of Activated Carbons from Cherry Stones by Activation with Potassium Hydroxide / M. Olivares-Marin, C. Fernandez-Gonzalez, A. Macias-Garcia, V. Gomez-Serrano // *Applied Surface Science*. – 2006. – Vol. 252, No. 17. – P. 5980 – 5983. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.11.018
9. Pore characterization of multi-walled carbon nanotubes modified by KOH / S. M. Lee, S. C. Lee, J. H. Jung, H. J. Kim // *Chemical Physics Letters*. – 2005. – Vol. 416, No. 4 – 6. – P. 251 – 255. doi: 10.1016/j.cplett.2005.09.107
10. Попова, А. А. Исследование влияния технологических параметров на аппаратное оформление процесса производства активированного углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2022. – № 1. – С. 20 – 30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30
11. Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood / H. Benaddi, T. J. Badosz, J. Jagiello, J. A. Schwarz, J. N. Rouzaud, D. Legras, F. Beguin // *Carbon*. – 2000. – Vol. 38, No. 5. – P. 669 – 674. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00134-7
12. Niu, J. J. Effect of temperature on chemical activation of carbon nanotubes / J. J. Niu, J. N. Wang // *Solid State Sciences*. – 2008. – Vol. 10, No. 9. – P. 1189 – 1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016
13. Carbon material with high specific surface area and high pseudocapacitance: Possible application in supercapacitors / Y. Vol'fkovich, V. Sosenkin, A. Rychagov [et al.] // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2021. – Vol. 319. – Art. 111063. doi: 10.1016/j.micromeso.2021.111063
14. Шубин, И. Н. Структурно-иерархическая схема процесса высокотемпературной активации углеродного материала / И. Н. Шубин, А. А. Попова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 308 – 316. doi: 10.17277/vestnik.2024.02.pp.308-316
15. Шубин, И. Н. Исследование физико-химических и структурных характеристик активированного высокопористого углеродного материала на основе декстрина и оксида графена / И. Н. Шубин, А. А. Попова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 155 – 163. doi: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.155-163

16. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы / Н. В. Чесноков, Н. М. Микова, И. П. Иванов, Б. Н. Кузнецов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 42 – 53.
17. Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene / Y. Zhu, S. Murali, M. D. Stoller [et al.] // Science. – 2011. – Vol. 332, No. 6037. – P. 1537 – 1541. doi:10.1126/science.1200770
18. Comparative study of nanopores in activated carbons by HRTEM and adsorption methods / V. Gun'ko, O. Kozynchenko, S. Tennison [et al.] // Carbon. – 2012. – Vol. 50, No. 9. – P. 3146 – 3153. doi: 10.1016/j.carbon.2011.10.009
19. Teng, H. Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation / H. Teng, S.-C. Wang // Carbon. – 2000. – Vol. 38, No. 6. – P. 817 – 824. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00160-8
20. Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressure / M. Jorda-Beneyto, F. Suarez-Garcia, D. Lozano-Castell, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano // Carbon. – 2007. – Vol. 45, No. 2. – P. 293 – 303. doi: 10.1016/j.carbon.2006.09.022
21. Liu, Y. Investigation of preparation and structures of activated carbon nanotubes / Y. Liu, Z. Shen, K. Yokogawa // Materials Research Bulletin. – 2006. – Vol. 41, No. 8. – P. 1503 – 1512. doi: 10.1016/j.materresbull.2006.01.017
22. KOH and NaOH Activation Mechanisms of Multiwalled Carbon Nanotubes with Different Structural Organization / E. Raymundo-Pinero, P. Azais, T. Cacciaguerra, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano, F. Beguin // Carbon. – 2005. – Vol. 43, No. 4. – P. 786–795. doi: 10.1016/j.carbon.2004.11.005
23. KOH activation of carbon nanofibers / S.-H. Yoon, S. Lim, Y. Song [et al.] // Carbon. – 2004. – Vol. 42, No. 8–9. – P. 1723 – 1729. doi: 10.1016/j.carbon.2004.03.006
24. Influence of the activating agent and the inert gas (type and flow) used in an activation process for the porosity development of carbon nanofibers / V. Jiménez, P. Sánchez, J. Luis Valverde, A. Romero // Journal of Colloid and Interface Science. – 2009. – Vol. 336, No. 2. – P. 712 – 722. doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.017
25. Fierro, V. Highly microporous carbons prepared by activation of kraft lignin with KOH / V. Fierro, V. Torne, A. Celzard // Studies in Surface Science and Catalysis. – 2007. – No 160. – P. 607 – 614. doi: 10.1016/S0167-2991(07)80078-4
26. Surface and Structural Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotubes Following Different Oxidative Treatments / K. A. Wepasnick, B. A. Smith, K. E. Schrote [et al.] // Carbon. – 2011. – Vol. 49, No. 1. – P. 24 – 36. doi: 10.1016/j.carbon.2010.08.034
27. Synergistic Effect of Potassium Hydroxide and Steam Co-Treatment on the Functionalization of Carbon Nanotubes Applied as Basic Support in the Pd-Catalyzed Liquid-Phase Oxidation of Ethanol / W. Dong, W. Xia, K. Xie [et al.] // Carbon. – 2017. – Vol. 121. – P. 452 – 462. doi: 10.1016/J.CARBON.2017.06.019
28. Shubin, I. N. Features of implementation options for the process of high-temperature activation of carbon material / I. N. Shubin, A. A. Popova // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2023. – Vol. 8, No. 1. – P. 041 – 048. doi:10.17277/jamt.2023.01.pp.041-048
29. Синтез, свойства и применение углеродных адсорбентов / под ред. А. А. Фомкина. – Москва : Граница, 2021. – 312 с.
30. Колокольцев, С. Н. Углеродные материалы: свойства, технологии, применения : учеб. пособие / С. Н. Колокольцев. – Долгопрудный : Интеллект, 2012. – 296 с.
31. Shubin, I. N. Promising sorbents based on compacted highly porous carbon materials / I. N. Shubin, E. S. Mkrtchyan, O. A. Ananyeva // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2023. – Vol. 8, No. 4. – P. 270 – 278. doi: 10.17277/jamt.2023.04.pp.270-278

32. Zgrzebnicki, M. Sorption and Textural Properties of Activated Carbon Derived from Charred Beech Wood / M. Zgrzebnicki, A. Kałamaga, R. J. Wróbel // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26, No. 24. – P. 7604. doi: 10.3390/molecules26247604
33. Попова, А. А. Аппаратурно-технологическое оформление производства активированного углеродного материала / А. А. Попова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 318 – 327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327
34. Шубин, И. Н. Особенности аппаратурно-технологического оформления процесса получения компактированных углеродных материалов / И. Н. Шубин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2024. – № 1(766). – С. 57 – 67. doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-57-67
35. Мухин, В. М. Производство и применение углеродных адсорбентов : учеб. пособие / В. М. Мухин, В. Н. Клушин. – Москва : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 308 с.
36. Мкртчян, Э. С. Исследование перспективных углеродных сорбентов, полученных методом высокотемпературной активации в процессах очистки водных растворов от красителей / Э. С. Мкртчян, А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Перспективные материалы*. – 2023. – № 11. – С. 28 – 38. doi: 10.30791/1028-978X-2023-11-28-38

---

## The Effect of Binding Components on the Characteristics of Compacted Carbon Material

I. N. Shubin✉

*Department of Engineering and Technology for Nanoproduct Production,  
i.shubin77@yandex.ru; TSTUniversity, Tambov, Russia*

**Keywords:** activated carbon material; compaction; porosity; binding components; specific surface area.

**Abstract:** High-temperature alkaline activation of carbon material in an inert environment and its compaction were carried out using various binders – polyvinyl alcohol, polyvinyl acetate, and basalt fiber. The physical and structural characteristics of compacted activated carbon material obtained in the previous experiments were studied, namely, the specific surface area and porosity (total pore volume and size) using the BET method, and the homogeneity of the component distribution in the experimental samples using simultaneous thermal analysis (TG and DSC analysis). The results of the studies are presented. The uneven distribution and nonlinear effect of the binding components on the physical and structural characteristics of the studied compacted activated carbon materials throughout their volume were established.

### References

1. Dyachkova T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* [Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes], Moscow: Spektr, 2013, 152 p. (In Russ.)
2. Hirscher M., Becher M., Haluska M., Quintel A. [et al.], Hydrogen Storage in Carbon Nanostructures, *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, no. 330-332, pp. 654-658. doi:10.1016/S0925-8388(01)01643-7
3. Olontsev V.F., Farberova E.A., Minkova A.A. [et al.], [Optimization of the porous structure of activated carbons in the process of technological production], *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of the Perm

National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2015, no. 4, pp. 9-23. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis, *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3(19), pp. 28-32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032

5. Fenelonov V.B. *Poristyy uglerod* [Porous carbon], Novosibirsk: Institut kataliza SO RAN, 1995, 518 p. (In Russ.)

6. Popova A.A., Shubin I.N. [Investigation of technological activation parameters affecting the characteristics of nanoporous carbon material], *Materialovedenie* [Materials Science], 2022, no. 11, pp. 3-8. doi: 10.31044/1684-579X-2022-0-11-3-8 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Carvalho A.P., Cardoso B., Pires J., Carvalho M.B. Preparation of activated carbons from cork waste by chemical activation with KOH, *Carbon*, 2003, vol. 41, no. 14, pp. 2873-2876. doi: 10.1016/S0008-6223(03)00323-3

8. Olivares-Marin M., Fernandez-Gonzalez C., Macias-Garcia A., Gomez-Serrano V. Preparation of activated carbons from cherry stones by activation with potassium hydroxide, *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, no. 17, pp. 5980-5983. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.11.018

9. Lee S.M., Lee S.C., Jung J.H., Kim H.J. Pore characterization of multi-walled carbon nanotubes modified by KOH, *Chemical Physics Letters*, 2005, vol. 416, no. 4-6, pp. 251-255. doi: 10.1016/j.cplett.2005.09.107

10. Popova A.A., Shubin I.N. [Study of the influence of technological parameters on the hardware design of the production process of activated carbon material], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Mechanical Engineering], 2022, no. 1, pp. 20-30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Benaddi H., Badosz T.J., Jagiello J., Schwarz J.A., Rouzaud J.N., Legras D., Beguin F. Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood, *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669-674. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00134-7

12. Jun Jie Niu, Jian Nong. Effect of temperature on chemical activation of carbon nanotubes, *Solid State Sciences*, 2008, vol. 10, no. 9, pp. 1189-1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016

13. Volkovich Y., Sosnenkin V., Rychagov A. [et al.], Carbon material with high specific surface area and high pseudocapacitance: Possible application in supercapacitors, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, vol. 319, art. 111063. doi: 10.1016/j.micromeso.2021.111063

14. Shubin I.N., Popova A.A. [Structural and hierarchical scheme of the process of high-temperature activation of carbon material], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 308-316. doi: 10.17277/vestnik.2024.02.pp.308-316 (In Russ., abstract in Eng.)

15. Shubin I.N., Popova A.A. [Study of physicochemical and structural characteristics of activated highly porous carbon material based on dextrin and graphene oxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 1, pp. 155-163. doi: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.155-163 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Chesnokov N.V., Mikova N.M., Ivanov I.P., Kuznetsov B.N. [Production of carbon sorbents by chemical modification of fossil coals and plant biomass], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry], 2014, vol. 7, no. 1, pp. 42-53. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Zhu Y., Murali S., Stoller M.D. [et al.], Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene, *Science*, 2011, vol. 332, no. 6037, pp. 1537-1541. doi: 10.1126/science.1200770



18. Gun'ko V., Kozynchenko O., Tennison S., Leboda R., Skubiszewska-Zieba J., Mikhailovsky S. Comparative study of nanopores in activated carbons by HRTEM and adsorption methods, *Carbon*, 2012, vol. 50, pp. 3146-3153. doi: 10.1016/j.carbon.2011.10.009
19. Teng H., Wang S.-C. Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation, *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 817-824. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00160-8
20. Jorda-Beneyto M., Suarez-Garcia F., Lozano-Castell D., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A. Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressure, *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 293-303. doi: 10.1016/j.carbon.2006.09.022
21. Liu Y., Shen Z., Yokogawa K. Investigation of preparation and structures of activated carbon nanotubes, *Materials Research Bulletin*, 2006, vol. 41, no. 8, pp. 1503-1512. doi: 10.1016/j.materresbull.2006.01.017
22. Raymundo-Pinero E., Azais P., Cacciaguerra T., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A., Beguin F. KOH and NaOH activation mechanisms of multiwalled carbon nanotubes with different structural organization, *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 4, pp. 786-795. doi: 10.1016/j.carbon.2004.11.005
23. Yoon S.H., Lim S., Song Y., Ota Y., Qiao W., Tanaka A. [et al.], KOH activation of carbon nanofibers, *Carbon*, 2004, vol. 42, no. 8-9, pp. 1723-1729. doi: 10.1016/j.carbon.2004.03.006
24. Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L., Romero A. Influence of the activating agent and the inert gas (type and flow) used in an activation process for the porosity development of carbon nanofibers, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 336, no. 2, pp. 712-722. doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.017
25. Fierro V., Torne-Fernandez V., Celzard A. Highly microporous carbons prepared by activation of kraft lignin with KOH. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2007, no. 160, pp. 607-614. doi: 10.1016/S0167-2991(07)80078-4
26. Wepasnick K.A., Smith B.A., Schrote K.E. [et al.], Surface and Structural Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotubes Following Different Oxidative Treatments. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 24-36. doi: 10.1016/j.carbon.2010.08.034
27. Dong W., Xia W., Xie K. [et al.], Synergistic Effect of Potassium Hydroxide and Steam Co-Treatment on the Functionalization of Carbon Nanotubes Applied as Basic Support in the Pd. Catalyzed Liquid-Phase Oxidation of Ethanol. *Carbon*, 2017, vol. 121, pp. 452-462. doi: 10.1016/J.CARBON.2017.06.019
28. Shubin I.N., Popova A.A. Features of implementation options for the process of high-temperature activation of carbon material, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 41-48. doi: 10.17277/jamt.2023.01.pp.041-048
29. Fomkin A.A. (Ed.) *Sintez, svoystva i primeneniye ugleodnykh adsorbentov* [Synthesis, properties and application of carbon adsorbents], Moscow, Granitsa, 2021, 312 p. (In Russ.)
30. Kolokoltsev S.N. *Uglerodnye materialy: svoystva, tekhnologii, primeneniya* [Carbon materials: properties, technologies, applications], Dolgoprudny: Intellect, 2012, 295 p. (In Russ.)
31. Shubin I.N., Mkrtchyan E.S., Ananyeva O.A. Promising sorbents based on compacted highly porous carbon materials, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, no. 4, pp. 270-278. doi:10.17277/jamt.2023.04.pp.270-278
32. Zgrzebnicki M., Kałamaga A., Wróbel R. J. Sorption and textural properties of activated carbon derived from charred beech wood, *Molecules*, 2021, no. 26, pp. 7604. doi: 10.3390/molecules26247604
33. Popova A.A. [Apparatus and technological design of the production of activated carbon material], *Transactions of the Tambov State Technical University*,



2021, vol. 27, no. 2, pp. 318-327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327. (In Russ., abstract in Eng.)

34. Shubin I.N. [Features of hardware and technological design of the process of obtaining compacted carbon materials], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2024, no. 1(766), pp. 57-67. doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-57-67 (In Russ., abstract in Eng.)

35. Mukhin V.M., Klushin V.N. *Proizvodstvo i primeneniye uglerodnykh adsorbentov* [Production and application of carbon adsorbents], Moscow: Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, 2012, 308 p. (In Russ.)

36. Mkrtchyan E.S., Popova A.A., Shubin I.N. [Study of promising carbon sorbents obtained by high-temperature activation in the processes of purifying aqueous solutions from dyes], *Perspektivnyye materialy* [Perspective materials], 2023, no. 11, pp. 28-38. doi: 10.30791/1028-978X-2023-11-28-38 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Einfluss von Bindemitteln auf die Eigenschaften des verdichteten Kohlenstoffmaterials**

**Zusammenfassung:** Es ist eine Hochtemperatur-Alkalinisation von Kohlenstoffmaterial in einer inerten Atmosphäre durchgeführt, gefolgt von dessen Verdichtung unter Verwendung verschiedener Bindemittel – Polyvinylalkohol, Polyvinylacetat und Basaltfaser. Die physikalisch-strukturellen Eigenschaften des verdichteten aktivierten Kohlenstoffmaterials aus zuvor experimentell hergestellten Proben sind untersucht, insbesondere die spezifische Oberfläche und Porosität (Gesamtporenvolumen und -größe) mittels BET-Methode sowie die Homogenität der Verteilung der Komponenten der experimentellen Proben mittels synchroner thermischer Analyse (TGA- und DSC-Analyse). Die Forschungsergebnisse sind präsentiert. Es sind eine ungleichmäßige Verteilung und ein nichtlinearer Einfluss der Bindemittelkomponenten auf die physikalisch-strukturellen Eigenschaften des untersuchten verdichteten Aktivkohlematerials über dessen gesamtes Volumen festgestellt.

---

### **Influence des liants sur les caractéristiques du matériau de carbone compact**

**Résumé:** Est réalisée l'activation alcaline à haute température du matériau natif de charbon dans un milieu inerte, son compactage à l'aide de divers matériaux de liaison-alcool polyvinylique, acétate de polyvinyle et fibre de basalte. Sont étudiées les caractéristiques physiques et structurelles du matériau carboné active compact à partir des échantillons expérimentaux précédemment obtenus: la surface spécifique et la porosité (volume total des pores et leur taille) par la méthode BET et l'homogénéité de la distribution des composants des échantillons expérimentaux par la méthode d'analyse thermique synchrone (analyse TG et DSK). Les résultats des études sont présentés. La distribution inégale et l'influence non linéaire des composants de liaison sur les caractéristiques physico-structurelles des matériaux carbonés activés compactés étudiés en volume sont établies.

---

**Автор: Шубин Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.