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. № 2.

Четырехъязычный научно-теоретический и прикладной журнал широкого профиля

Four-Language Scientific-Theoretical and Applied Multidisciplinary Journal

Основан в 1995 году

Выходит 4 раза в год

http://vestnik.tstu.ru

Россия Тамбов
Издательство ТГТУ

Совет редакторов

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции: 392000, Тамбовская область, г.о. город Тамбов, г. Тамбов,
ул. Советская, д. 106/5, помещ. 2.
Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».
Эл. почта: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Редакторы иностранных текстов: Н. А. Гунина, В. С. Григорьева, Н. Ю. Бородулина.
Редакторы: И. М. Курносова, О. В. Мочалина.
Компьютерная верстка: О. В. Мочалина, И. М. Курносова

Подписано в печать 14.05.2025. Дата выхода в свет 29.05.2025.
Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,90; уч.-изд. л. 18,20. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 015.
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 Dvoretsky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

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

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

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы 180

Чернышова Т. И., Курносов Р. Ю., Карелин П. И. Определение метрологической исправности блока аналого-цифрового преобразования в структуре информационно-измерительных систем 180

Мыльников Л. А. Повышение эффективности производственных систем за счет синхронизации процессов планирования при актуализации множества производственных проектов 189

Прокопьев А. П. К вопросу построения интеллектуальной системы контроля плотности для асфальтоукладчиков на основе программно-аппаратных средств с применением конвейера данных 200

Пахомов А. М., Конкина В. В. Решение задачи оптимального календарного планирования производства единичного и мелкосерийного типа 212

Хвостов А. А., Хаустов И. А., Тихомиров С. Г., Битюкова Е. А. Мониторинг молекулярно-массового распределения полимера в процессе термоокислительной деструкции на основе скрытой марковской цепи 223

Кайченов А. В., Емашев М. О., Яроцкая А. А. Разработка и исследование цифрового двойника лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока» 235

Рачкова С. А., Мокрозуб В. Г. Теоретико-множественный подход к решению задач организационно-технической системы школьного образования 245

Алексеев В. В., Иванов Д. А., Рыжов И. Г. Системный подход к организации структуры управления мобильной сетью в интересах обеспечения устойчивости связи 259

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия 269

Промтов М. А., Желудков В. Г., Гатапова Н. Ц., Степанов А. Ю. Расчет диаметра частиц эмульсии, полученной в роторном импульсном аппарате 269

Меренцов Н. А., Соколов-Добрев Н. С., Голованчиков А. Б., Персидский А. В., Топилин М. В. Исследование динамических характеристик привода механического перемешивающего устройства емкостного аппарата в целях снижения его вибронагруженности. Часть 1. Разработка блок-схемы и динамической модели передачи 281

Козлова Н. П., Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Глебов И. В. Синтез моноэтанолэтилендиамина и исследование его физико-химических свойств 301

Смолихина П. М., Апаршева В. В., Харламова О. С. Влияние структурообразователей на реологические показатели начинок при производстве шоколадных конфет ... 311

Машиностроение. Металлообработка 321

Севостьянов М. В., Проценко А. М., Севостьянов В. С., Бушуев Д. А. Рециркуляционный смеситель комбинированного действия для гомогенизации композиционных смесей 321

Божко Г. В., Фокина М. С., Соколов А. С., Баскаков А. С., Коновалов И. В. Влияние повышенной температуры на работу фланцевого соединения с полимерной прокладкой 335

Капуткин Д. Е., Капуткина Н. А. Влияние электрических разрядов на повышение скорости диффузии при электролитно-плазменной обработке металлов 344

CONTENTS

Automation. Information Technology. Control. Instruments 180

Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu., Karelin P. I. Determining the Metrological Performance of Analog-to-Digital Conversion Unit in the Structure of Information-Measuring Systems 180

Mylnikov L. A. Increasing the Efficiency of Production Systems by Synchronizing Planning Processes when Updating a Set of Production Projects..... 189

Prokopyev A. P. On the Question of Constructing an Intelligent System of Density Control for Asphalt Pavers Based on Software and Hardware Using a Data Conveyor 200

Pakhomov A. M., Konkina V. V. Solution to the Problem of Optimal Schedule Planning of Single and Small-Batch Production 212

Khvostov A. A., Khaustov I. A., Tikhomirov S. G., Bityukova E. A Monitoring of Polymer Molecular Weight Distribution during Thermal-Oxidative Degradation Based on Hidden Markov Chain..... 223

Kaichnov A. V., Emashev M. O., Yarotskaya A. A. Development and Research of the Digital Twin of the Laboratory Stand "Automatic System to Regulate the Rotation Frequency of a DC Motor" 235

Rachkova S. A., Mokrozub V. G. A Multiple Theoretical Approach to Solving Problems of the Organizational and Technical System of School Education..... 245

Alekseev V. V., Ivanov D. A., Ryzhov I. G. A System Approach to Organizing Mobile Network Management Structure to Ensure Communication Stability..... 259

Chemical Engineering and Related Industries. Chemistry..... 269

Promtov M. A., Zheludkov V. G., Gatapova N. Ts., Stepanov A. Yu. Calculation of the Particle Diameter of Emulsion Prepared in a Rotary Pulse Apparatus..... 269

Merentsov N. A., Sokolov-Dobrev N. S., Golovanchikov A. B., Persidskiy A. V., Topilin M. V. A Study of Dynamic Characteristics of the Drive of a Mechanical Mixing Device of a Capacitive Apparatus to Reduce its Vibration Loading. Part 1. Development of a Block Diagram and Dynamic Model of Transmission 281

Kozlova N. P., Dorokhov R. V., Ferapontov Yu. A., Glebov I. V. Synthesis of Monoethanolethylenediamine and Study of its Physicochemical Properties 301

Smolikhina P. M., Aparsheva V. V., Kharlamova O. S. Influence of Structure-Forming Agents on Rheological Properties of Fillings in the Production of Chocolate Candies 311

Mechanical Engineering. Metal Treatment 321

Sevostyanov M. V., Protsenko A. M., Sevostyanov V. S., Bushuev D. A. Recirculation Mixer of Combined Action for Homogenization of Composite Mixtures..... 321

Bozhko G. V., Fokina M. S., Sokolov A. S., Baskakov A. S., Konovalov I. V. The Impact of Elevated Temperature on Operation of Flange Joint with Polymer Gasket 335

Kaputkin D. E., Kaputkina N. A. The Influence of Electric Discharges on Increasing the Diffusion Rate in Electrolytic-Plasma Treatment of Metals 344

УДК 681.2.083
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.180-188

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ИСПРАВНОСТИ БЛОКА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СТРУКТУРЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов✉, П. И. Карелин

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

Ключевые слова: аналитико-вероятностный метод прогнозирования; аналого-цифровой преобразователь; информационно-измерительная система; метрологическая исправность; метрологическая надежность; метрологическая характеристика; метрологический ресурс; погрешность; средства измерений.

Аннотация: Рассмотрено определение метрологической исправности блока аналого-цифрового преобразования в структуре информационно-измерительных систем. Показано решение задачи оценки метрологической надежности (МН) блока аналого-цифрового преобразования (АЦП) на этапе проектирования на основе использования аналитико-вероятностного метода прогнозирования. Разработанная методика оценки МН блока аналого-цифрового преобразования на этапе его проектирования позволяет оперативно оценить вероятность сохранения метрологической исправности блока АЦП в целях решения задачи оценки метрологической надежности как самого блока, так и ИИС в целом.

Введение

Информационно-измерительные системы (**ИИС**) находят широкое применение в практике измерительных экспериментов во всех отраслях промышленного производства и научных исследованиях. Разработка метрологического обеспечения средств измерений (**СИ**) на стадии их проектирования является определяющим фактором в достижении требуемой точности и достоверности проводимых измерительных экспериментов с использованием таких ИИС. Особую значимость в структуре метрологического обеспечения имеет показатель метрологической исправности, определяющий состояние ИИС, при котором метрологические характеристики (**МХ**) соответствуют установленным требованиям, а также показателям метрологической надежности (**МН**), оцениваемым способностью ИИС сохранять установленные пределами допуска $[-S_{доп}, +S_{доп}]$ значения метрологической характеристики S при определенных режимах и условиях использования. Таким образом, указанные составляющие метрологического обеспечения определяются изменением во времени МХ ИИС. На рисунке 1 представлена обобщенная структурная схема ИИС. Как известно, метрологическая надежность ИИС определяется уровнем МН блоков измерительного канала.

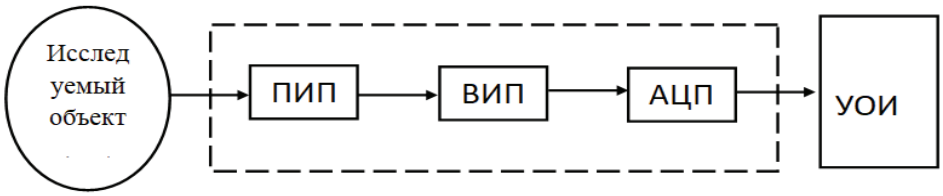


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ИИС:
ПИП, ВИП – соответственно первичный и вторичный измерительные преобразователи;
УОИ – устройство обработка информации

Важное место в структуре измерительного канала ИИС отводится блоку аналого-цифрового преобразования (**АЦП**) [1 – 5]. Среди требований, предъявляемых к рассматриваемому блоку, значительное место занимает высокая точность, сложность, важность выполняемых функций, а также широта функциональных возможностей.

Все перечисленные обстоятельства определяют значимость для этого блока в структуре ИИС обеспечения требуемого уровня метрологических характеристик и МН соответственно. Следовательно, определение МН АЦП является весьма важным при оценке уровня метрологической надежности проектируемой информационно-измерительной системы в целом.

Решение задачи оценки МН АЦП на этапе проектирования проводится с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования [1 – 3]. Основу метода составляет математическое моделирование нестационарных случайных процессов изменения во времени метрологических характеристик проектируемых СИ, что позволяет дать вероятностную оценку показателей МН, к числу которых относится величина метрологического ресурса (при решении задачи обратного прогнозирования) и вероятность сохранения метрологической исправности (при решении задачи прямого прогнозирования) в произвольный момент времени предстоящей эксплуатации. Разработанный способ оценки метрологического ресурса АЦП и сформированная на его основе методика, позволяющие оперативно и корректно оценить требуемый показатель, представлены в [1, 6].

Не менее важным для оценки качества и МН АЦП и ИИС в целом является показатель вероятности сохранения метрологической исправности $P_{исп}(t)$ на этапе предстоящей эксплуатации проектируемого ИС. Важной априорной информацией для предстоящей эксплуатации АЦП является прогноз величины данного показателя прежде всего на интервале времени, определяемом временем предстоящих метрологических поверок от начала эксплуатации, то есть $t_0 = 0$ до $t_1, t_2, \ldots, t_n$, где n – число предстоящих поверок АЦП на этапе эксплуатации.

Оценка метрологической надежности АЦП получением численной оценки величины $P_{исп}(t)$

Рассмотрим оценку МН АЦП получением численной оценки значений вероятности сохранения метрологической исправности $P_{исп}(t)$ в указанные моменты времени эксплуатации, определяемые временем предстоящих поверок. На рисунке 2 представлена функциональная схема АЦП. В состав измерительного канала рассматриваемого устройства входят модули: цепь согласования сигналов, выравнивающий усилитель и устройство настройки частоты. При этом показатель $P_{исп}(t)$ АЦП можно определить по значениям вероятности сохранения метрологической исправности на моменты предстоящих поверок $t_1, t_2, \ldots, t_n$ составляющих АЦП модулей.

Рис. 2. Функциональная схема блока АЦП

Успешное решение задачи оценки МН на этапе проектирования АЦП определяется адекватностью применяемых математических моделей.

Математическая модель функционирования каждого из модулей при условии постоянства внешних влияющих факторов выражается зависимостью значения выходного параметра модуля y от текущего значения входного сигнала x блока и параметров комплектующих элементов перечисленных модулей

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

где $\vec{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, ..., \xi_k\}$ – вектор параметров комплектующих модуль элементов.

Математическая модель метрологической характеристики каждого модуля, входящего в структуру АЦП ИИС, имеет вид

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

С учетом выражений (1) и (2) математические модели для каждого модуля, составляющих блок АЦП, имеют следующий вид:

– цепь согласования сигналов (**ЦСС**):

$$U_{\text{вх}}^{\text{ЦСС}} = F_{1.1}\left(x, \vec{\xi}\right); \tag{3}$$

$$S^{\text{ЦСС}} = F_{1.2}\left(x_1, \vec{\xi}^{\text{ЦСС}}\right); \tag{4}$$

– выравнивающий усилитель (**ВУ**):

$$U_{\text{вх}}^{\text{ВУ}} = F_{2.1}\left(x, \vec{\xi}\right); \tag{5}$$

$$S^{\text{ВУ}} = F_{2.2}\left(x_2, \vec{\xi}^{\text{ВУ}}\right); \tag{6}$$

– устройство настройки частоты (**УНЧ**):

$$U_{\text{вх}}^{\text{УНЧ}} = F_{3.1}\left(x, \vec{\xi}\right); \tag{7}$$

$$S^{\text{УНЧ}} = F_{3.2}\left(x_3, \vec{\xi}^{\text{УНЧ}}\right), \tag{8}$$

где $\vec{\xi}^{\text{ЦСС}}, \vec{\xi}^{\text{ВУ}}, \vec{\xi}^{\text{УНЧ}}$ – векторы параметров комплектующих элементов модулей цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно; $U_{\text{вх}}^{\text{ЦСС}}, U_{\text{вх}}^{\text{ВУ}}, U_{\text{вх}}^{\text{УНЧ}}$ – входные напряжения модуля цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно.

Математические модели (3) – (8) служат основой для статистического моделирования и построения математических моделей изменения во времени исследуемых МХ, определяемых для каждого из модулей функциями временного изменения математического ожидания МХ и функциями, которые характеризуют изменения границ отклонения возможных значений исследуемой МХ от среднего значения. В общем виде такие модели для каждого из модулей могут быть представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} m_S(t); \\ \Psi_{\pm\sigma(t)} = m_S(t) \pm c\sigma_S(t), \end{cases} \quad (9)$$

где c – постоянный коэффициент, выбираемый в зависимости от заданного уровня доверительной вероятности $P_{\text{дов}}$ ($c = 3$, при $P_{\text{дов}} = 0{,}973$); $m_S(t)$ – математическое ожидание МХ; $\sigma_S(t)$ – среднеквадратическое отклонение МХ в произвольные моменты эксплуатации.

Полученные математические модели изменения во времени МХ каждого из модулей в структуре АЦП позволяют рассчитать вероятность сохранения метрологической исправности модулей и АЦП в целом [2, 7]. Используемый показатель вероятности сохранения метрологической исправности $P_{\text{исп}}(t)$ на момент времени t_i, $i = 1, \ldots, n$, определяется выражением

$$P_{\text{исп}}(t) = P\{-S_{\text{доп}} \le S(t_i) \le S_{\text{доп}}\} = \frac{1}{2\pi\sigma_S(t_i)} \int_{-S_{\text{доп}}}^{S_{\text{доп}}} \exp\left(-\frac{\left[S - m_S(t_i)\right]^2}{2\sigma_S^1(t_i)}\right) dS, \quad (10)$$

где $m_S(t_i)$, $\sigma_S(t_i)$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение исследуемой МХ (как правило, погрешности) в момент времени метрологической поверки (контроля) t_i, $i = 1, 2, 3, \ldots, n$.

Графическое представление $P_{\text{исп}}(t)$ отражено на рис. 3. Графически искомый показатель определяется как площадь под кривой плотности распределения вероятности МХ $p(s)$, ограниченной интервалами допуска $[-S_{\text{доп}};+S_{\text{доп}}]$.

Расчет искомого показателя $P_{\text{исп}}(t)$ по выражению (10) осуществляется по построенным математическим моделям изменения во времени МХ каждого из модулей. Показатель вероятности сохранения метрологической исправности рассчитывается по выражению (10) для соответствующих времени предстоящих поверок $t_1, t_2, \ldots, t_n$.

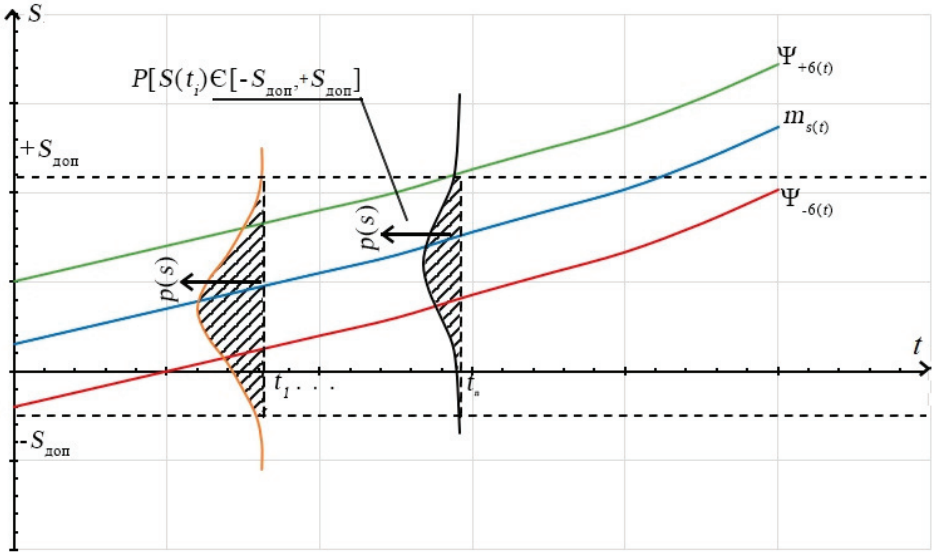


Рис. 3 Изменение во времени метрологической характеристики

Алгоритмы оперативной оценки метрологической надежности по величине $P_{исп}(t)$

Для оперативного принятия решения о МН АЦП по уровню $P_{исп}(t)$ на предстоящий интервал эксплуатации рассматриваемого измерительного средства можно использовать значения такого показателя с учетом доминирующего влияния основного модуля в структуре аналого-цифрового преобразователя. Выбор такого модуля проводится по минимальному из результатов расчета $P_{исп}(t)$ для всех трех модулей для t=0 – начало эксплуатации. На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма оперативной оценки МН по величине $P_{исп}(t)$.

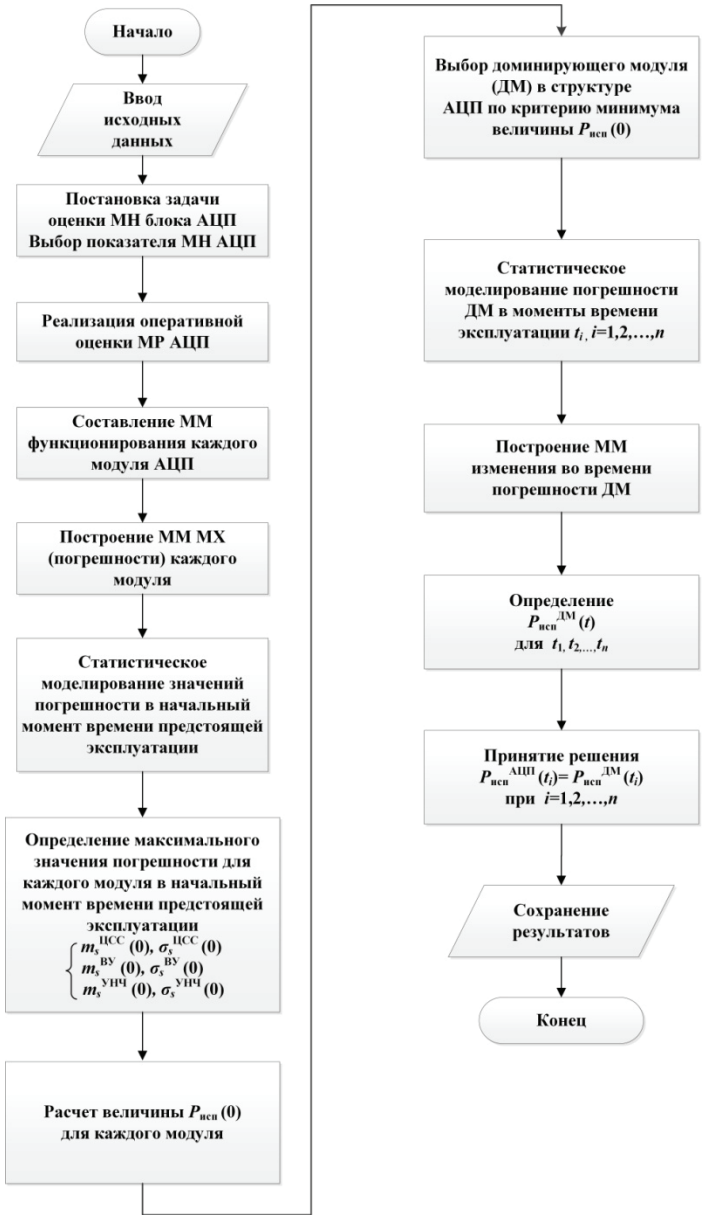


Рис. 4. Блок-схема методики оценки МН

Приведенная на рис. 4 блок-схема алгоритма оценки $P_{\text{исп}}(t)$ аналого-цифрового преобразователя в структуре ИИС включает следующие этапы:

1. На основе проведенного сбора данных и анализа информации по техническому составу блока, его структурных, функциональных и принципиальных схем формируется база данных по параметрам элементов, входящих в состав модулей АЦП.

2. В соответствии с постановкой задачи по оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразования проводится выбор основного показателя МН – метрологической исправности $P_{\text{исп}}(t)$.

3. Осуществляется оценка метрологической исправности блока АЦП.

3.1. Строятся математические модели функционирования модулей, составляющих измерительный канал аналого-цифрового преобразователя: цепи дифференциальной нагрузки и согласования, нормализующего усилителя и устройства формирования частоты в соответствии с зависимостями вида (3), (5), (7).

3.2. На следующем этапе строятся математические модели МХ для составляющих блок АЦП модулей (4), (6), (8). В качестве исследуемых метрологических характеристик выбирается относительная погрешность соответствующего модуля.

3.3. Проводится статистическое моделирование значений погрешностей в начальный момент времени предстоящей эксплуатации согласно алгоритму, представленному в [1, 4, 5, 8]. В результате реализации статистического моделирования находятся значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения исследуемой МХ соответствующих модулей в структуре АЦП в начальный момент времени предстоящей эксплуатации.

3.4. С учетом заданной доверительной вероятности определяются значения погрешностей для каждого модуля в начальный момент времени предстоящей эксплуатации, при этом формируется база данных по значениям погрешности всех модулей блока АЦП, то есть

$$\max\left\{\left(m_S^{\text{ЦСС}}(0)+3\sigma_S^{\text{ЦСС}}(0)\right),\left(m_S^{\text{ВУ}}(0)+3\sigma_S^{\text{ВУ}}(0)\right),\left(m_S^{\text{УНЧ}}(0)+3\sigma_S^{\text{УНЧ}}(0)\right)\right\}, \qquad (11)$$

где $m_S^{\text{ЦСС}}(0), m_S^{\text{ВУ}}(0), m_S^{\text{УНЧ}}(0)$ – математические ожидания модуля цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно; $\sigma_S^{\text{ЦСС}}(0), \sigma_S^{\text{ВУ}}(0), \sigma_S^{\text{УНЧ}}(0)$ – среднеквадратические отклонения модуля цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно.

3.5. По полученным в п. 3.4 значениям погрешностей рассчитываются величины $P_{\text{исп}}^{\text{ЦСС}}(0), P_{\text{исп}}^{\text{УНЧ}}(0), P_{\text{исп}}^{\text{ВУ}}(0)$, и выбирается в качестве доминирующего модуль, имеющий минимальное значение этого показателя, то есть $\min\left\{P_{\text{исп}}^{\text{ЦСС}}(0), P_{\text{исп}}^{\text{УНЧ}}(0), P_{\text{исп}}^{\text{ВУ}}(0)\right\}$.

3.6. Для выбранного доминирующего модуля (**ДМ**) осуществляется статистическое моделирование нестационарного случайного процесса изменения во времени его погрешности. Базой данных для проведения моделирования являются значения параметров составляющих элементов и характер их изменения во времени его МХ – погрешности.

3.7. По полученным в п. 3.6 значениям характеристик исследуемой погрешности в различные моменты времени и при различных условиях эксплуатации строится математическая модель изменения во времени погрешности выбранного в п. 3.6 модуля.

3.8. С использованием аппарата аналитико-вероятностного прогнозирования и формулы вида (10) для оценки $P_{исп}(t)$ определяется величина данного показателя для выбранного доминирующего модуля в моменты времени предстоящих поверок АЦП $t_1, t_2, \ldots, t_n$, при этом принимается $P_{исп}^{АЦП}(t_i) = P_{исп}^{ДМ}(t_i)$, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Заключение

Сформированная таким образом база данных по прогнозируемым значениям вероятности сохранения метрологической исправности АЦП позволяет не только получить информацию об уровне метрологической надежности в моменты времени поверок в процессе предстоящей эксплуатации, но и оперативно дать рекомендации по предстоящему метрологическому обслуживанию аналого-цифрового преобразователя и информационно-измерительной системы в целом.

Список литературы

1. Курносов, Р. Ю. Оценка погрешности программно-определяемой платформы в структуре информационно-измерительных систем / Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 3(55). – С. 192 – 197. doi: 10.25699/SSSB.2024.55.3.026

2. Курносов, Р. Ю. Метрологический анализ измерительной процедуры цифровых средств измерений / Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 375 – 382. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.375-382

3. Чернышова, Т. И. Повышение показателей метрологической надежности при проектировании информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов, П. И. Карелин // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, Тамбов, 07 мая 2024 г. – Тамбов, 2024. – С. 212 – 213.

4. Мищенко, С. В. Метрологическая надежность измерительных средств / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, Т. И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 218 с.

5. Алексеев, В. В. Структуры и алгоритмы коррекции основной погрешности измерительного канала с использованием измеряемой величины / В. В. Алексеев, Е. О. Грубо, П. Г. Королев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 4(19). – С. 23 – 32.

6. Kurnosov, R. Yu. Methodology for Assessing Metrological Reliability Analog-To-digital Converter in the Structure Information and Measurement Systems / R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova, V. N. Chernyshov // Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021 : 3, Lipetsk, 10–12 November 2021 year. 3rd International Conference. – Lipetsk, 2021. – P. 90 – 93. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632242

7. Кондрашкова, Г. А. Метрологический анализ систем измерения и управления: учебное пособие / Г. А. Кондрашкова, И. В. Бондаренкова, А. В. Черникова. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2017. – 134 с.

8. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э И. Цветков. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.

Determining the Metrological Performance of Analog-to-Digital Conversion Unit in the Structure of Information-Measuring Systems

T. I. Chernyshova, R. Yu. Kurnosov✉, P. I. Karelin

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

Keywords: analytical and probabilistic forecasting method; analog-to-digital converter; information-measuring system; metrological serviceability; metrological reliability; metrological characteristic; metrological resource; error; measuring instruments.

Abstract: The article considers the determination of the metrological serviceability of the analog-to-digital conversion unit in the structure of information-measuring systems. The solution to the problem of assessing the metrological reliability (MR) of the analog-to-digital conversion (ADC) unit at the design stage is shown based on the use of the analytical and probabilistic forecasting method. The developed methodology for assessing the MR of the analog-to-digital conversion unit at the design stage allows for prompt assessment of the probability of maintaining the metrological serviceability of the ADC unit to solve the problem of assessing the metrological reliability of both the unit itself and the information-measuring system as a whole.

References

1. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I. [Estimation of the error of a software-defined platform in the structure of information and measurement systems], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2024, no. 3(55), pp. 192-197, doi: 10.25699/SSSB.2024.55.3.026 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I. [Metrological analysis of the measurement procedure of digital measuring instruments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 375-382, doi: 10.17277/vestnik. 2023.03.pp.375-382 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Chernyshova T.I., Kurnosov R.Yu., Karelin P.I. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. tr. IX Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem* [Radioelectronics. Problems and prospects of development: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation], Tambov, May 07, 2024, Tambov, 2024, pp. 212-213. (In Russ.)

4. Mishchenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. *Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring instruments], Moscow: Mashinostroenie, 2001, 218 p. (In Russ.)

5. Alekseev V.V., Grubo E.O., Korolev P.G. [Structures and algorithms for correcting the basic error of the measuring channel using the measured value], *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific State University], 2010, no. 4(19), pp. 23-32. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I., Chernyshov V.N. Methodology for Assessing Metrological Reliability Analog-To-digital Converter in the Structure Information and Measurement Systems, *Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*, SUMMA 2021:3, Lipetsk, November 10-12, 2021. 3rd International Conference, Lipetsk, 2021, pp. 90-93, doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632242

7. Kondrashkova G.A., Bondarenkova I.V., Chernikova A.V. *Metrologicheskiy analiz sistem izmereniya i upravleniya: uchebnoye posobiye* [Metrological analysis of

measurement and control systems: a textbook], St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2017, 134 p. (In Russ.)

8. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli ob"yektov, protsedur i sredstv izmereniy. Metrologicheskiy analiz. Metrologicheskiy sintez* [Metrology. Models of objects, procedures, and measuring instruments. Metrological analysis. Metrological synthesis], St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Technical University "LETI", 2014, 293 p. (In Russ.)

Bestimmung der messtechnischen Integrität des Blocks der Analog-Digital-Umwandlung in der Struktur der Informations- und Messsysteme

Zusammenfassung: Der Artikel untersucht die Bestimmung der metrologischen Brauchbarkeit einer Analog-Digital-Umwandlungseinheit im Aufbau von Informations- und Messsystemen. Die Lösung des Problems der Bewertung der metrologischen Zuverlässigkeit (MZ) eines Analog-Digital-Umwandlungsblocks (ADU) in der Entwurfsphase ist anhand der Verwendung einer analytisch-probabilistischen Prognosemethode gezeigt. Die entwickelte Methodik zur Bewertung des MZ des Analog-Digital-Umwandlungsblocks in der Entwurfsphase ermöglicht die sofortige Bewertung der Wahrscheinlichkeit der Aufrechterhaltung der messtechnischen Funktionsfähigkeit des ADU-Blocks, um das Problem der Bewertung der messtechnischen Zuverlässigkeit sowohl des Blocks selbst, als auch des IMS als Ganzes zu lösen.

Détermination de l'intégrité métrologique de l'unité de conversion analogique-numérique dans la structure des systèmes d'information et de mesure

Résumé: Est considérée la définition de l'intégrité métrologique de l'unité de transformation analogique-numérique dans la structure des systèmes d'information et de mesure. La solution du problème d'évaluation de la fiabilité métrologique (FM) de l'unité de conversion analogique-numérique (CAN) au stade de la conception est illustrée en utilisant la méthode de prévision analytique et probabiliste. La méthodologie développée pour évaluer le FM de l'unité de conversion analogique-numérique au stade de sa conception permet d'évaluer rapidement la probabilité de maintenir l'intégrité métrologique de l'unité CAN afin de résoudre le problème de l'évaluation de la fiabilité métrologique de l'unité elle-même et de l'unité de transformation analogique-numérique dans son ensemble.

Авторы: ***Чернышова Татьяна Ивановна*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; ***Курносов Роман Юрьевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; ***Карелин Павел Игоревич*** – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 519.7, 658.5
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.189-199

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИ АКТУАЛИЗАЦИИ МНОЖЕСТВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЕКТОВ

Л. А. Мыльников✉

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», leonid.a.mylnikov@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: контур обработки информации; модель Курамото; множество производственных проектов; нотация EdPM; производственная система; статистическое исследование; структурно-функциональное моделирование.

Аннотация: Предложено использовать описание контуров обработки информации в нотации EdPM и модели Курамото для сокращения множества возможных вариантов. Рассмотрена задача на примере взаимосвязи стратегического, тактического и оперативного уровней планирования, принятых в производственных системах. Проведена оценка эффективности контура обработки информации решения задачи актуализации множества производственных проектов путем статистического исследования данных, получаемых в результате имитации его работы.

Введение

Использование структурно-функционального моделирования в настоящее время открывает возможности не только для описания и экспертного оценивания моделей контуров обработки информации, но и для изучения их формальными методами.

В работе [1] предложена нотация EdPM (*англ.* Event-driven Process Methodology), которая позволяет по графическому представлению получать знаково-символьное описание и компьютерную программу для исследования эффективности [2] методами имитации ее работы.

Во многих моделях контуров обработки информации присутствуют как элементы, генерирующие поток заявок/случайных событий, так и периодические процессы. В производственных системах (**ПрС**) периодические процессы связаны с закупками, поставками, планированием и управлением на разных уровнях (оперативном, тактическом и стратегическом). Для решения задач планирования в ПрС нашли широкое применение методы системного анализа и исследования операций [3]. Задачи управления опираются на использование таких концепций, как каскадная модель [4], спиральная модель [5], методологии Agile [6], Scrum [7], Design Thinking [8], Kanban, Lean Production [9], Six Sigma [10], Just-in-Time [11] и др. Данные методы позволяют найти эффективные характеристики системы, но не учитывают влияние многих процессов друг на друга, которые часто не оказывают существенного влияния на эффективность за счет того, что ряд параметров принимают значения, определенные эмпирическим путем в результате множественного применения подходов на разных предприятиях (например, периоды стратегического, тактического и оперативного планирования). В сложившейся прак-

тике стратегическое планирование осуществляется с периодичностью в один год и более, тактическое – с интервалами от квартала до месяца, а оперативное, как правило, – с периодичностью в неделю или декаду. Выбор таких значений не связан с организационными и инфраструктурными особенностями ПрС.

Цель работы – повышение эффективности контуров обработки информации, реализующих несколько процессов с разной периодичностью за счет их согласованности.

Методология

Возможно, согласованность периодических процессов приведет к повышению эффективности по подобию таких известных явлений, как синхронизация за счет слабого взаимодействия колебания маятников, синхронизация аплодисментов во время концертов, строевого шага, взаимодействие пятен на солнце и т.п. Для описания такого взаимодействия используют модель, предложенную Курамото в работе [12].

Если рассмотреть процесс актуализации множества производственных проектов (**МПП**), то его можно описать структурно-функциональной моделью,

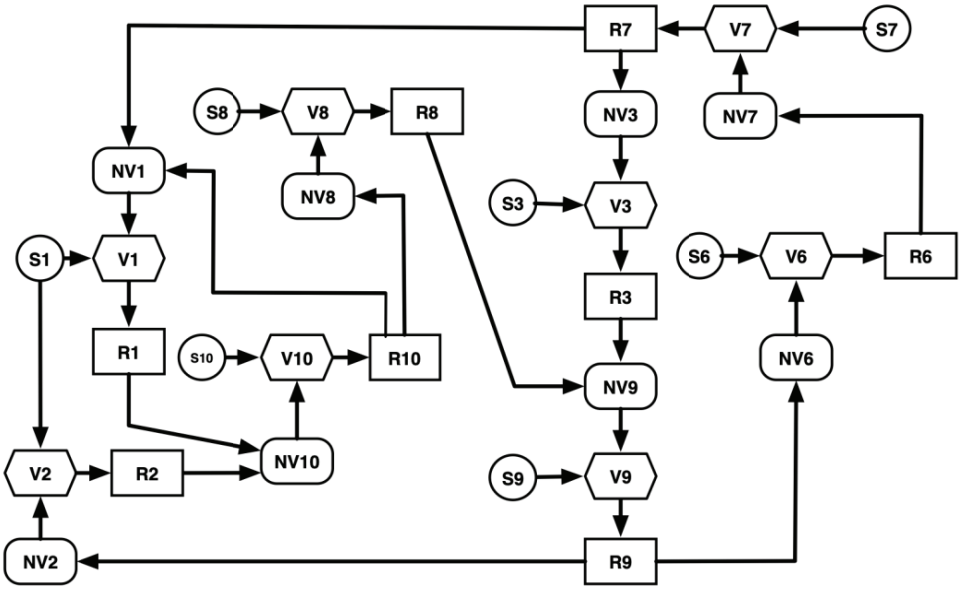


Рис. 1. Процесс актуализации множества производственных проектов производственной системы в нотации EdPM:

S1 – появление нового проекта; S3 – обновление данных прогнозов; S6 – производство; S7 – время сбыта/продажи; S8 – изменение набора или состава возможных производственных корзин; S9 – объемно-календарное планирование; S10 – проверка изменений; V1 – исключение проектов из МПП; V2 – включение проектов МПП; V3 – прогнозирование параметров МПП; V6 – формирование и выбор траектории развития МПП; V7 – производство и сбыт/продажа; V8 – формирование множества МПП; V9 – объемно-календарное планирование; V10 – проверка на наличие проектов, меняющих МПП; R1 – множество проектов на исключение из МПП; R2 – множество проектов на включение в МПП; R3 – значения прогнозов параметров МПП; R6 – траектории развития МПП; R7 – объемы сбыта/продаж; R8 – возможные варианты МПП; R9 – объемно-календарный план; R10 – МПП; NV1 – данные о продажах товаров из МПП; NV2 – текущие планы производства и ресурсно-технологическое обеспечение; NV6 – данные о планах и ресурсах; NV7 – спрос и состояние склада; NV8 – АПК; NV9 – возможные варианты МПП; NV10 – МПП и множество проектов на включение и исключение

приведенной на рис. 1 [13], где элементами, задающими периодичность работы, являются элементы S, среди которых: S1 – описывается потоком Пуассона с заданной интенсивностью; S3 – соответствует периодам получения статистики о ценах и объеме продаж; S7 – может выполняться по своему графику (графику, согласованному с заказчиком) или по факту накопления в зависимости от типа производства; S6 – соответствует уровню оперативного планирования; S8 – соответствует уровню стратегического планирования; S9 – соответствует уровню тактического планирования; S10 – проводится по факту появления новых проектов (в некоторых случаях, если требуется согласование комиссии, может проводиться с заданной периодичностью, обычно 7 – 30 дней).

Таким образом, если предположение верно, то синхронизация процессов планирования S6, S8 и S9 должна приводить к повышению эффективности контура обработки информации с поправкой на запаздывания, связанные с выполнением опраций в блоках V (см. рис. 1).

Обозначенные выше значения для S6 (7 – 10 дней), S8 (365 и более дней) и S9 (30 – 93 дней) являются приблизительными и, имея модель системы, можно имитировать ее работу и перебирать возможные варианты. Таким образом, приходим к комбинаторной задаче, размерность которой может быть очень большой, так как истинные диапазоны значений для перебора не известны и могут ограничиваться только способностью инфраструктуры ПрС.

Для уменьшения числа рассматриваемых вариантов необходимо найти зависимости между частотами, с которыми будут работать элементы S6, S8 и S9. Для случая с тремя осцилляторами, соответствующими элементам S6, S8 и S9, которым соответствуют частоты ω_1, ω_2 и ω_3, то согласно модели Курамото, запишем систему [14]:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \omega_1 + k_{12}\sin(\theta_2 - \theta_1); \\ \dot{\theta}_2 = \omega_2 + k_{12}\sin(\theta_2 - \theta_1) + k_{23}\sin(\theta_3 - \theta_2); \\ \dot{\theta}_3 = \omega_3 + k_{23}\sin(\theta_2 - \theta_3). \end{cases}$$

Если считать, что осцилляторы S6, S8 и S9 синхронизированы, тогда

$$k^2 = \frac{((\Omega - \omega_2) - r\Delta\omega)^2}{4(1 - r^2)\sin^2\alpha} + \frac{(r(\Omega - \omega_2) - \Delta\omega)^2}{4(1 - r^2)\cos^2\alpha},$$

где $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_3$; $r = \dfrac{\Delta k}{k}$ – коэффициент несимметрии среднего осциллятора, $k = \dfrac{k_{12} + k_{23}}{2}$, $\Delta k = \dfrac{k_{12} - k_{23}}{2}$, $\alpha = \dfrac{\theta_1 - \theta_3}{2}$.

Если рассмотреть частоту как скорость планирования $\omega = N/T$, где N – число раз, когда проводилось планирование; T – рассматриваемое время (период), то для частот уровней планирования должно выполняться отношение $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$, кроме этого, согласно данным, принятым на практике, должна наблюдаться определенная пропорция в разнице частот. Например, если за период стратегического планирования взять один год (365 дней), то тактическому уровню планирования может соответствовать квартал/месяц, что соответствует ω_1 = от 4 до $12\omega_2$, следовательно, при переходе на оперативный уровень ω_2 будет соответственно принимать значения от 4 до $12\omega_3$.

Учитывая, что рассматриваемые колебания являются гармоническими, то выполняется зависимость $\theta = \omega T + \theta_0$, где θ_0 – начальная фаза, значение которой примем $\theta_0 = 0$ и получим $\theta = \omega T$. Выполнив подстановки, получаем

$$k^2 = \frac{\left[\cos^2\left(\frac{T}{2}(\omega_1 - \omega_3)\right) + r^2 \sin^2\left(\frac{T}{2}(\omega_1 - \omega_3)\right)\right]\left[\left(\frac{\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_3}{3}\right)^2 + (\omega_1 - \omega_3)^2\right]}{\left(1 - r^2\right)^2 \sin^2(T\,(\omega_1 - \omega_3))} -$$

$$- \frac{\frac{2}{3} r\left(\omega_1^2 - 2\omega_1\omega_2 + 2\omega_2\omega_3 - \omega_3^2\right)}{\left(1 - r^2\right)^2 \sin^2(T\,(\omega_1 - \omega_3))}.$$

Для равных парциальных частот:

$$k_{12} = \frac{2(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2 + \omega_1};$$

$$k_{23} = \frac{2(\omega_3 - \omega_2)}{\omega_3 + \omega_2},$$

откуда

$$k = \left(\frac{2\omega_2\omega_3 - 2\omega_1\omega_2}{(\omega_2 + \omega_1)(\omega_3 + \omega_2)}\right).$$

Получив представленное выражение, можно провести эксперимент, который покажет, насколько верны выбранные эмпирически частоты и соотношения между ними. Для этого примем, что является переменой и выполняется соотношение $\omega_2 = 16\omega_3$. Тогда, сделав подстановку, можно проверить, выполняется ли эмпирическое соотношение между ω_1 и ω_2. Введем обозначение $\omega = \omega_2 = 16\omega_3$ и после подстановки получим

$$\left(\frac{32\omega^2 - 2\omega_1\omega}{17\omega(\omega + \omega_1)}\right)^2 = \frac{[C][D] - \frac{2}{3} r\left(\omega_1^2 - 2\omega_1\omega - 224\omega^2\right)}{\left(1 - r^2\right)^2 \sin^2(T\,(\omega_1 - 16\omega))},$$

где

$$C = \cos^2\left(\frac{T}{2}(\omega_1 - 16\omega)\right) + r^2 \sin^2\left(\frac{T}{2}(\omega_1 - 16\omega)\right);$$

$$D = \left(\frac{\omega_1 + 14\omega}{3}\right)^2 + (\omega_1 - 16\omega)^2.$$

Выразить зависимость ω от ω_1 из этого выражения затруднительно, но можно построить график зависимости и определить по нему значение ω по выбранному значению ω_1. Аналогичное выражение можно получить и для зависимости $\omega_1 = n\omega_2$:

$$\left(\frac{2\omega_2\omega_3 - 2n\omega_2^2}{(n+1)\omega_2(\omega_3+\omega_2)}\right)^2 = \frac{[A]\,[B] - \frac{2}{3}r\left(\left(n^2-2n\right)\omega_2^2 + 2\omega_2\omega_3 - \omega_3^2\right)}{\left(1-r^2\right)^2 \sin^2\left(T\,(n\omega_2-\omega_3)\right)},$$

где

$$A = \cos^2\left(\frac{T}{2}(n\omega_2-\omega_3)\right) + r^2\sin^2\left(\frac{T}{2}(n\omega_2-\omega_3)\right);$$

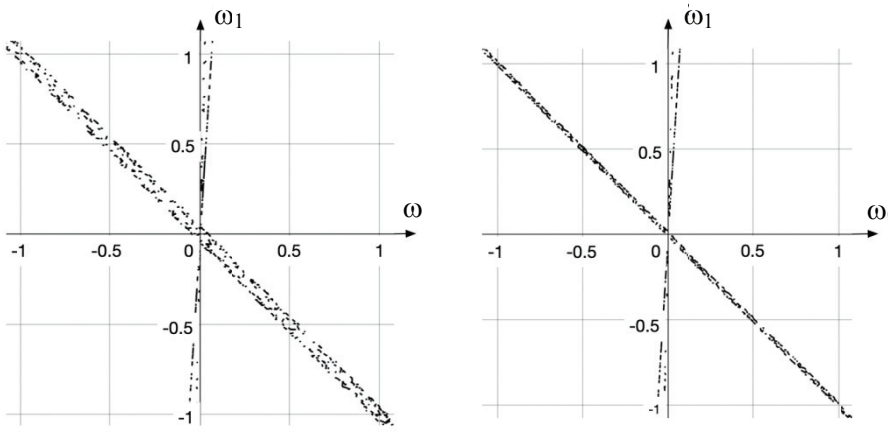
$$B = \left(\frac{(n-2)\omega_2+\omega_3}{3}\right)^2 + (n\omega_2-\omega_3)^2.$$

Полученные выражения неопределенны для $r = 1$, из чего следует, что полной согласованности достичь не удастся, а также при $r = 0$ – решение может быть либо не определено, либо может существовать при равных значениях частот, что приводит к слому иерархии системы планирования.

Результаты

Если рассмотреть $T = 365$ дней и перебрать значения r, то получим зависимости, приведенные на рис. 2.

В реальной практике значения должны быть положительными. Графики допускают не все возможные сочетания значений. Тогда при моделировании перебор сочетаний частот должен приводить к повышению и понижению эффективности. Одно из возможных решений, когда $\omega_2 = 0{,}1\omega_1$. Для $\omega_1 = 365$ дней, $\omega_2 = 37$ дней. Если учитывать, что $\omega_3 = \omega_2/l$, где $l = 3\ldots16$, то ω_3 принимает значения от 12 до 2 дней.



а) *б)*

Рис. 2. Графики взаимной связи между частотами ω и ω_1 для значений *r*:
а – $r = 0{,}4$; *б* – $r = 0{,}9$

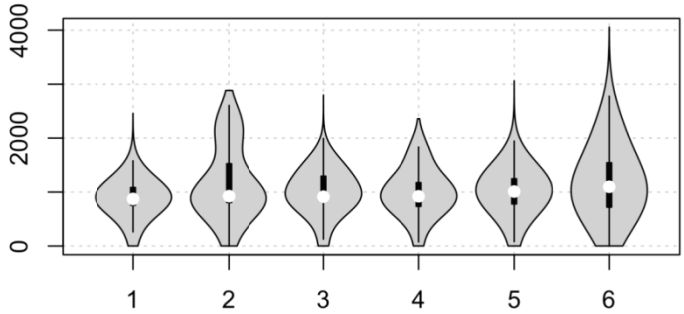


Рис. 3. Скрипичные диаграммы для времени прохождения проектов через контур обработки информации:
1 – S8 = 365, S9 = 96, S6 = 10; 2 – S8 = 365, S9 = 29, S6 = 10; 3 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 10; 4 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 7; 5 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 15; 6 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 8

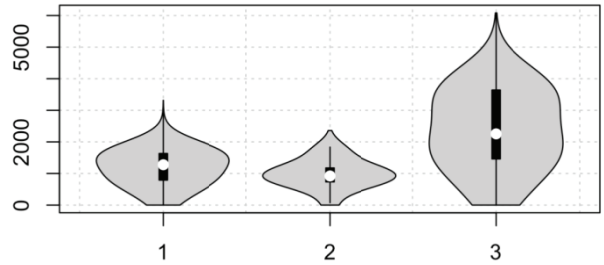


Рис. 4. Скрипичные диаграммы для времени прохождения проектов через контур обработки информации:
1 – S8 = 365, S9 = 29, S6 = 7; 2 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 7; 3 – S8 = 365, S9 = 93, S6 = 7

Принимая один шаг расчета, равным одному дню, и перебирая различные сочетания частот на интервале моделирования, равном 10 000 шагам, получаем значения для времени обработки проекта (рис. 3).

Если перебирать только значения для S9, то наблюдаем аналогичную закономерность, приведенную на рис. 4 и подтверждающую факт того, что не все значения имеют одинаковую эффективность (принадлежат полученной функции).

Для второй зависимости примем $n = 10$. Тогда из полученного ранее выражения получим графики, приведенные на рис. 5 (значения для ω_3 существуют только при $0 < r < 0{,}6$).

В данном случае также видно, что сочетания пар ω_3 и ω_2 принимает только ограниченное число значений. При этом должно выполняться $\omega_3 < \omega_2$.

Проведя эксперимент, при котором будем перебирать значения для S6, получим результаты, приведенные на рис. 6. Из графиков видно, что есть частоты с большей и меньшей эффективностью, что согласуется с данными, полученными теоретически.

Из экспериментов видно, что, с одной стороны, эффективные сочетания частот могут быть найдены теоретически, а также подтверждены или найдены эмпирически. При теоретическом поиске для большого количества осцилляторов решение может оказаться сложным так же, как и для случая с нелинейной сложностью элементов V в зависимости от числа обращений (например, значений, выдаваемых элементом S1). В этом случае сдвиг фаз между осцилляторами будет меняться в зависимости от числа обращений. Однако использование методов имитационного моделирования для перебора возможных сочетаний, как было отмечено во введении, может оказаться ресурсоемким процессом.

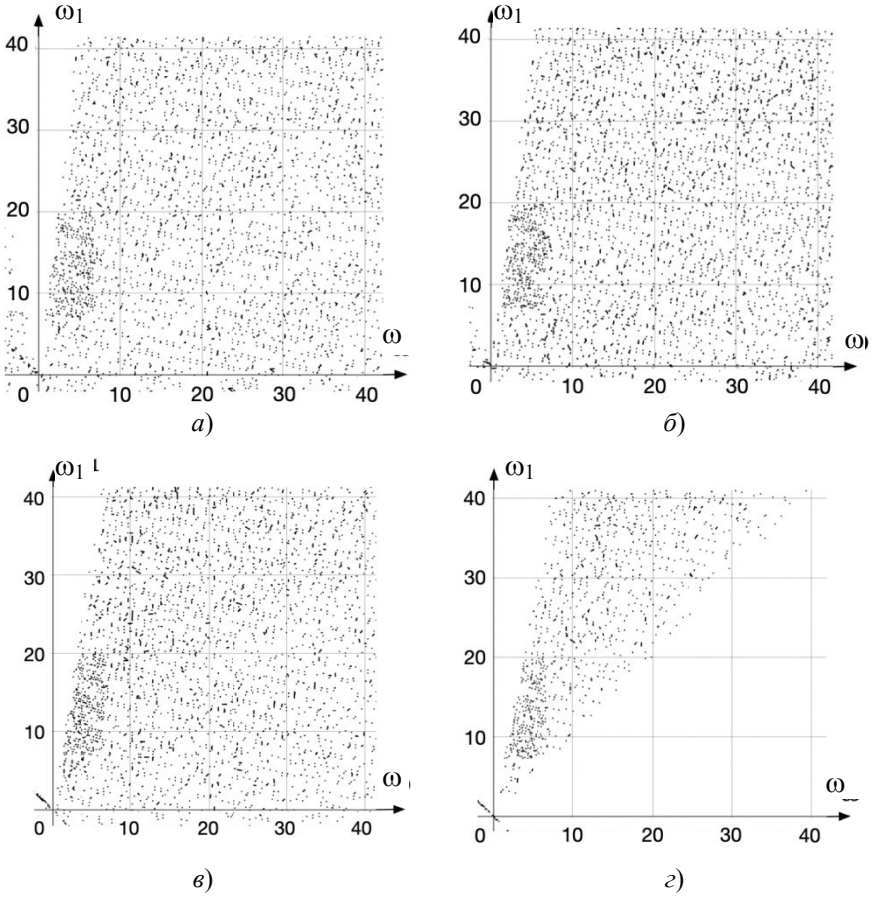


Рис. 5. Графики взаимной связи между частотами ω_2 и ω_3 для значений *r*:
а – *r* = 0,1; *б* – *r* = 0,2; *в* – *r* = 0,4; *г* – *r* = 0,5

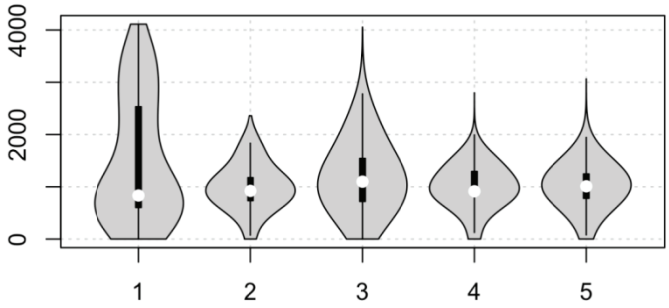


Рис. 6. Время прохождения проектов через контур обработки информации:
1 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 2; 2 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 7; 3 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 8;
4 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 10; 5 – S8 = 365, S9 = 36, S6 = 15

Сочетание этих подходов помогает определить диапазоны возможного изменения связанных частот при задании одной из них и тем самым сузить область поиска их эффективных сочетаний. Таким образом, получаем *алгоритм поиска эффективного сочетания частот осцилляторов для периодических процессов в контурах обработки информации*.

Шаг 1. Выбираем осциллятор, частоту которого будем задавать сами, и предполагаемое соотношение с частотами других осцилляторов исходя из особенностей и дополнительных данных рассматриваемого процесса.

Шаг 2. Записываем, используя модель Курамото, систему уравнений, описывающую взаимную связь частот и фаз.

Шаг 3. С учетом имеющейся информации о взаимной связи частот и фаз осцилляторов попарно выражаем связи частот и строим соответствующие графики.

Шаг 4. Рассматривая области допустимых значений, определяем области возможного изменения частоты для каждого из осцилляторов, дополняя их ограничениями, которые могут быть сформулированы исходя из особенностей предметной области или рассматриваемых процессов.

Шаг 5. Для найденного множества допустимых значений частот перебираем значения и проводим оценку эффективности путем имитации работы контура обработки информации с заданными значениями осцилляторов.

Шаг 6. Исходя из полученных значений оценки эффективности, выбираем вариант параметризации значений частот осцилляторов ($\arg\max_{\omega_1,\ldots,\omega_n} J$, где J – критерий эффективности; n – число осцилляторов).

В случае если для реализации рассматривается несколько вариантов конфигурации контура обработки информации, то определение диапазонов изменения значений осцилляторов и оценку эффективности необходимо проделать для каждого из осцилляторов, а уже потом осуществлять выбор варианта на основе данных по оценке эффективности.

Заключение

Представленный подход позволяет сравнивать варианты реализации контуров обработки информации на основе анализа статистики, получаемой в результате имитации их работы. При наличии в контуре обработки информации элементов с периодической работой для каждой конфигурации контура может сначала находиться наиболее эффективный режим работы, а затем уже происходит сравнение производительности найденных режимов работы, что в свою очередь повышает результативность методов поиска конфигураций структурно-функциональных моделей [15].

Список литературы

1. Мыльников, Л. А. Структурно-функциональное моделирование в управлении эффективностью информационной инфраструктуры поддержки принятия решений производственных систем / Л. А. Мыльников // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2023. – № 1. – С. 10 – 22.

2. Мыльников, Л. А. Структурно-функциональное моделирование в нотации Event-Driven Process Methodology как инструмент для генерации кода программ, имитирующих процессную деятельность / Л. А. Мыльников, А. Д. Салтыкова // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. – 2024. – № 12. – С. 1 – 8.

3. Первозванский, А. А. Математические модели в управлении производством / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1975. – 616 с.

4. Benington, H. D. Production of Large Computer Programs / H. D. Benington // IEEE Annals of the History of Computing. – 1983. – Vol. 5, No. 4. – P. 350 – 361.

5. Selby, R. W. Software engineering: Barry W. Boehm's lifetime contributions to software development, management, and research / R. W. Selby. – Hoboken, N.J. : Wiley-IEEE Press, 2007. – 770 p.

6. Yusuf, Y. Agile manufacturing / Y. Yusuf, M. Sarhadi, A. Gunasekaran // International Journal of Production Economics. – 1999. – No. 62(1–2). – P. 33 – 43. doi:10.1016/s0925-5273(98)00219-9

7. Сазерленд, Д. SCRUM. Революционный метод управления проектами / Д. Сазерленд. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2022. – 478 с.

8. Steinke, G. H. Innovating Information System Development Methodologies with Design Thinking / G. H. Steinke, M. Sh. Al-Deen, R. C. LaBrie // Proc. of the 5th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIT), March 2017. – Vol. 5. – P. 51 – 55.

9. Рис, Э. Бизнес с нуля: метод Lean Startup для быстрого тестирования идей и выбора бизнес-модели / Э. Рис ; пер. с англ. А. Стативка. – М. : Альпина Паблишер, 2014. – 253 с.

10. Demartini, C. Performance Management Systems: Design, Diagnosis and Use / C. Demartini. – Springer Science & Business Media, 2013. – 215 p.

11. Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system / Y. Sugimori [et al.]. // International Journal of Production Research. – 1977. – Vol. 15, No. 6. – P. 553 – 564.

12. Kuramoto, Y. Self-Entrainment of a Population of Coupled Non-Linear Oscillators / Y. Kuramoto. – Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1975. – P. 420 – 422. doi: 10.1007/BFb0013365

13. Мыльников, Л. А. Нотация Event-driven Process Methodology для исследования информационных процессов / Л. А. Мыльников, А. Д. Салтыкова, З. Ж. Аврамович // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2024. – № 7. – С. 19 – 30.

14. Blanter, E. M. Synchronization of the asymmetrical system with three non-identical Kuramoto oscillators: models of solar meridional circulation / E. M. Blanter, M. S. Elaeva, M. G. Shnirman // Computer Research and Modeling. – 2020. – Vol. 2, No. 12. – P. 345 – 356. doi:10.20537/2076-7633-2020-12-2-345-356

15. Мыльников, Л. А. Поиск эффективных топологий структурно-функциональных моделей процессной деятельности / Л. А. Мыльников, С. Л. Мыльникова, З. Ж. Аврамович // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. – 2025. – № 3. – С. 1 – 7.

Increasing the Efficiency of Production Systems by Synchronizing Planning Processes when Updating a Set of Production Projects

L. A. Mylnikov✉

Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems, leonid.a.mylnikov@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: information processing loop; Kuramoto model; set of production projects; EdPM notation; production system; statistical research; structural and functional modeling.

Abstract: It is proposed to use the description of information processing loops in EdPM notation and the Kuramoto model to reduce the set of possible options. The problem is considered using the example of the relationship between the strategic, tactical and operational planning levels adopted in production systems. The effectiveness of the information processing circuit for solving the problem of updating a set of production projects was assessed by means of a statistical study of the data obtained as a result of simulating its operation.

References

1. Myl'nikov L.A. [Structural and functional modeling in managing the efficiency of the information infrastructure for supporting decision-making in production systems], *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2: Informatsionnyye protsessy i sistemy* [Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems], 2023, no. 1, pp. 10-22. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Myl'nikov L.A., Saltykova A.D. [Structural and functional modeling in the Event-Driven Process Methodology notation as a tool for generating code for programs that simulate process activities], *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2. Informatsionnyye protsessy i sistemy* [Scientific and technical information. Series 2. Information processes and systems], 2024, no. 12, pp. 1-8. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Pervozvanskiy A.A. *Matematicheskiye modeli v upravlenii proizvodstvom* [Mathematical models in production management], Moscow: Nauka, 1975, 616 p. (In Russ.)

4. Benington H.D. Production of Large Computer Programs, *IEEE Annals of the History of Computing*, 1983, vol. 5, no. 4, pp. 350-361.

5. Selby R.W. *Software engineering: Barry W. Boehm's lifetime contributions to software development, management, and research*, Hoboken, N.J: Wiley-IEEE Press, 2007, 770 p.

6. Yusuf Y., Sarhadi M., Gunasekaran A. Agile manufacturing, *International Journal of Production Economics*, 1999, no. 62(1-2), pp. 33-43. doi:10.1016/s0925-5273(98)00219-9

7. Sazerlend D. *SCRUM. Revolyutsionnyy metod upravleniya proyektami* [SCRUM. A revolutionary method of project management], Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2022, 478 p. (In Russ.)

8. Steinke G.H., Al-Deen M.Sh., LaBrie R.C. Innovating Information System Development Methodologies with Design Thinking, *Proc. of the 5th International Conference on Applied Innovations in IT*, (ICAIIT), March 2017, vol. 5, pp. 51-55.

9. Ries E. *Business from scratch: the Lean Startup method for quickly testing ideas and choosing a business model*, Moscow: Al'pina Pablisher, 2014, 253 p.

10. Demartini C. *Performance Management Systems: Design, Diagnosis and Use*, Springer Science & Business Media, 2013, 215 p.

11. Sugimori Y. [et al.]. Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system, *International Journal of Production Research*, 1977, vol. 15, no. 6, pp. 553-564.

12. Kuramoto Y. *Self-Entrainment of a Population of Coupled Non-Linear Oscillators*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1975, pp. 420-422. doi: 10.1007/ BFb0013365

13. Myl'nikov L.A., Saltykova A.D., Avramovich Z.Zh. [Notation Event-driven Process Methodology for studying information processes], *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2: Informatsionnyye protsessy i sistemy* [Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems], 2024, no. 7, pp. 19-30. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Blanter E.M., Elaeva M.S., Shnirman M.G. Synchronization of the asymmetrical system with three non-identical Kuramoto oscillators: models of solar meridional circulation, *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 2, no. 12, pp. 345-356. doi:10.20537/2076-7633-2020-12-2-345-356

15. Myl'nikov L.A., Myl'nikova S.L., Avramovich Z.Zh. [Search for effective topologies of structural-functional models of process activity], *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2: Informatsionnyye protsessy i sistemy* [Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems], 2025, no. 3, pp. 1-7. (In Russ., abstract in Eng.)

Steigerung der Effizienz von Produktionssystemen durch Synchronisierung von Planungsprozessen bei der Aktualisierung mehrerer Produktionsprojekte

Zusammenfassung: Es ist vorgeschlagen, die Beschreibung der Konturen der Informationsverarbeitung in der EdPM-Notation und das Kuramoto-Modell zu verwenden, um die Menge der möglichen Varianten zu reduzieren. Das Problem ist am Beispiel der Verflechtung von strategischen, taktischen und operativen Planungsebenen in Produktionssystemen betrachtet. Die Effizienz der Informationsverarbeitungsschleife zur Lösung des Problems der Aktualisierung einer Reihe von Produktionsprojekten ist durch die statistische Untersuchung der Daten bewertet, die als Ergebnis der Simulation ihrer Arbeit erhalten worden sind.

Augmentation de l'efficacité des systèmes de la production compte tenu de la synchronisation des processus de la planification de la multitnde des projets de production

Résumé: Est proposé d'utiliser la description des contours de traitement de l'information dans la notation EdPM et du modèle Kuramoto pour réduire les nombreuses options possibles. Est examinée la tâche en prenant l'exemple de la relation entre les niveaux de planification stratégique, tactique et opérationnel adoptés dans les systèmes de production. Est réalisée une évaluation de l'efficacité du circuit de traitement de l'information pour résoudre le problème de l'actualisation de nombreux projets de production en examinant statistiquement les données obtenues à partir de la simulation de son travail.

Автор: ***Мыльников Леонид Александрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов Россия.

УДК 004.896
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.200-211

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНВЕЙЕРА ДАННЫХ

А. П. Прокопьев✉

Кафедра «Строительные материалы и технологии строительства», prok1@yandex.ru; ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

Ключевые слова: асфальтоукладчик; интеллектуальное уплотнение; конвейер анализа данных; машинное обучение; непрерывный контроль плотности; программно-аппаратные средства.

Аннотация: Непрерывный контроль качества уплотнения асфальтобетонных смесей в процессе строительства автомобильных дорог по технологии интеллектуального уплотнения строится на базе датчиков ускорения, устанавливаемых на вибрационных вальцах дорожных катков. Представлены варианты повышения эффективности управления плотностью при работе звена автоматизированных дорожных машин на основе использования системы непрерывного контроля для асфальтоукладчика, в том числе за счет обеспечения более высокой степени уплотнения, а также оптимизации звена дорожных катков и снижения стоимости дорожных покрытий. Предложено построение аппаратно-программного обеспечения для укладчиков разрабатывать с учетом концепции его жизненного цикла. В системе предусматривается обработка данных переменных на базе подходов, применяемых при разработке конвейеров машинного обучения. Показаны вариант конвейера данных и алгоритм обработки переменных в интеллектуальной системе контроля плотности для укладчиков.

Введение

Значительным резервом повышения эффективности дорожного строительства является автоматическое управление плотностью асфальтобетонной (**АБ**) смеси укладчиками. В работе [1] представлены результаты испытаний асфальукладчика (**АУ**) с высокоэффективным рабочим органом, который позволяет получить нормативную уплотненность АБ-смеси типа А марки I (ГОСТ 9128–2013) при скорости движения 3 м/мин, а также обеспечить экономию трудовых и энергетических ресурсов при сокращении обычно применяемых в технологическом процессе уплотнения дорожных катков легкого и среднего типов. Аналогом системы автоматического контроля плотности (**САКП**) для АУ являются программно-аппаратные средства систем интеллектуального уплотнения (*англ.* Intelligent Compaction (**IC**)) и непрерывного контроля уплотнения (*англ.* Continuous Compaction Control (**CCC**)) [2]. Большинство полевых исследований дорожных катков с системами IC/CCC разных производителей показали очень слабую корреляцию между показателями IC (*англ.* Intelligent Compaction Measurement Values (**ICMV**)) и плотностью АБ-смесей [3, 4].

Цель работы – построение новой открытой платформы системы автоматического контроля плотности АБ-смеси для АУ, созданной на базе современных программно-аппаратных средств с конвейером обработки данных.

Усовершенствование технологического процесса

Выполненные в работе исследования позволили сформулировать положения нормативно-технического документа для правильного учета изменений в технологических процессах уплотнения АБ-смесей дорожных машин, оснащенных техническими средствами: системами автоматического контроля (**САК**) / системами автоматизированного управления (**САУ**) плотностью. Предложено изменение в форме дополнения в нормативный документ организации КГКУ «КрУДор» (Красноярский край) СТО 01-2020 (с изменением № 2) «Правила разработки и оформления проектов производства работ на капитальный ремонт и ремонт автодорог», представив п. 5.5 СТО 01-2020 в трактовке, позволяющей учитывать использование оснащенных САК / САУ плотностью для АУ и дорожных катков при формировании звеньев дорожных машин в документе «Технологическая схема потока», входящего в состав основного организационно-технологического документа – проекта производства работ на устройство АБ-покрытия автомобильной дороги.

Пункт 5.5 СТО 01-2020 (с изменением № 2) предложено изложить в новой редакции с изменением в форме дополнения: «5.5 Технологическая схема потока – документ, в котором приводят технологическую последовательность строительных работ, указывают составы отрядов, машины и механизмы на все виды периода с разбивкой их по конструктивным элементам, распределением по километрам или пикетам; время выполнения работ; движение специализированных подразделений или отдельных бригад, работающих в составе комплексных или специализированных потоков; сосредоточенные работы»;

***дополнение к п.* 5.5** «При формировании составов звеньев дорожных машин – асфальтоукладчиков и дорожных катков, оснащенных системами автоматического контроля (управления) плотности АБ-смеси, в целях обеспечения высокого качества дорожного покрытия по всей ширине полосы (автомобильной дороги) и повышения производительности уплотнения, рекомендуется планировать организацию комплектов звеньев на основе установленной максимальной уплотняющей способности АУ. Подбор типов и количества автоматизированных дорожных катков рекомендуется осуществлять с учетом прогноза значений плотности (коэффициента уплотнения) после АУ и наличия дорожных катков на предприятии. Для операционного контроля качества уплотнения АБ-смеси АУ необходимо проводить точечный контроль плотности портативным плотномером».

Варианты технологических схем потока с использованием звеньев автоматизированных дорожных машин приведены на рис. 1. Современный вариант технологического процесса уплотнения с автоматизированными вибрационными катками, оснащенными приборами непрерывного контроля плотности показан на рис. 1, *а*. Предложен усовершенствованный вариант технологии уплотнения (см. рис. 1, *б*), предусматривающий использование принципа максимальной уплотняющей эффективности АУ, оснащенных САК / САУ плотностью, и автоматизированных катков тяжелого типа (11 ÷ 14).

Технологический процесс уплотнения верхних слоев АБ-покрытий с учетом предложенного усовершенствования характеризуется следующими действиями звена дорожных машин. Между АУ и дорожными катками обеспечивается информационное взаимодействие мобильными сетями 4G – 5G. Асфальтоукладчики и вибрационные катки создают силовое трамбующее (трамбующий брус), вибрационное (вибрационная плита, вибрационный валец катка) и статическое (валец

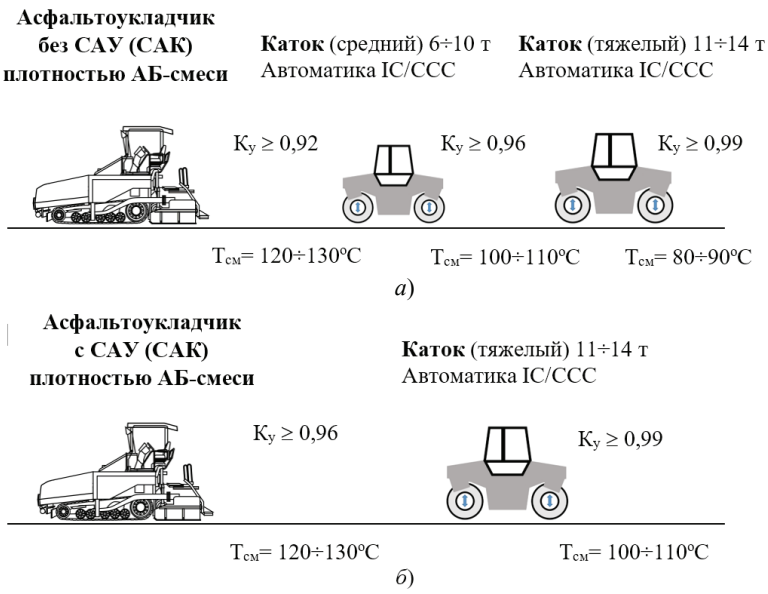


Рис. 1. Варианты звеньев машин для уплотнения АБ-смесей

катка) уплотняющее воздействия на АБ-смесь. Заключительное уплотнение АБ-смеси выполняется тяжелыми катками – 2 ÷ 4 прохода по одному следу с использованием вибрационного и(или) статического режимов, в зависимости от плотности АБ-смеси после АУ.

Предложена структурно-функциональная схема системы управления плотностью АБ-смеси звеном дорожных машин (рис. 2). Автоматизированная система управления отличается от существующих новым модулем САКП АУ, блоком интеллектуального принятия решения и прибором распознавания аномалий в системе управления дорожным катком.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: y^* – задающее воздействие (уставка); e – ошибка регулирования; u^*, y – регулирующий вход и регулируемый

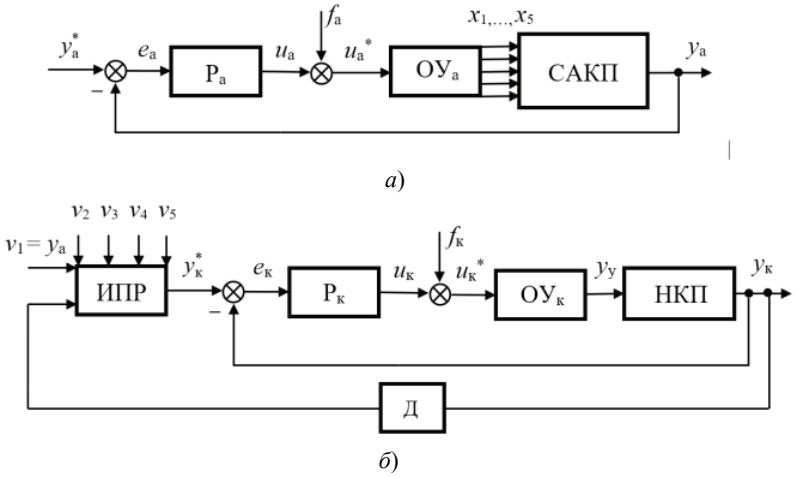


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы автоматизированного управления плотностью АБ-смеси звеном дорожных машин:
а – асфальтоукладчиком; *б* – вибрационным катком

выход объекта соответственно; f – внешние возмущения, приложенные ко входу объекта; ОУ – объект управления; Р – регулятор; ИПР, НКП – блоки соответственно интеллектуального принятия решения и непрерывного контроля плотности; Д – прибор распознавания аномалий; $y_1, \ldots, y_5$ – переменные на входе САКП: показатель типа смеси, скорость АУ, усилие трамбующего бруса, частота трамбующего бруса и толщина слоя соответственно; $v_1, \ldots, v_5$ – переменные на входе блока ИПР: коэффициент уплотнения $K_у$, скорость катка, температура смеси, температура воздуха, частота вибрации соответственно; индексы: а – АУ; к – дорожный каток.

Задающее воздействие САУ плотностью АУ $y_а^*$ определяется на этапе подготовки проекта производства работ с учетом наличия дорожных катков, максимальной уплотняющей способности укладчика. Регулирующей переменной является частота ударов трамбующего бруса. Выходная переменная САУ плотностью (САУП) укладчиком $y_а$ определяется в блоке интеллектуальной САКП и в режиме реального времени передается на вход САУП вибрационных катков. Входные данные САУП вибрационных катков: $K_у$ после прохода АУ; скорость дорожного катка; частота колебаний вибратора вальца; температура поверхности слоя; температура воздуха. Уставка $y_к^*$ определяется в блоке интеллектуального принятия решения. Регулируемая переменная дорожного катка $K_у$ определяется в реальном времени САК плотности после каждого прохода. В главной обратной связи САУ для обнаружения рассогласования параметров сигналов и его преобразования в сигнал, удобный для дальнейшей обработки, используется блок распознавания аномалий.

Построение конвейера обработки данных

Построение САК плотности для АУ выполнено на основе подходов, применяемых при разработке конвейеров машинного обучения [5]. Разработка аппаратно-программного обеспечения платформы САКП проведена с учетом дальнейшего использования в разных моделях АУ на территории Российской Федерации, а также последующей технической поддержки и обновлений. Для обеспечения этих функций предложена архитектура конвейера обработки данных.

Предложенная встроенная платформа САКП собирает необработанные данные из трех потоков данных переменных (рис. 3). Основной поток данных предназначен для сбора данных акселерометра по вертикальному каналу в режиме реального времени. Два других потока данных непрерывно собирают данные о температуре поверхности АБ-смеси и местоположении АУ.

Постоянные данные переменные, включая параметры АУ, такие как частота трамбования брусом f_t, частота колебания вибратора плиты f_{scr}, скорость АУ $v_а$, эксцентриковый момент $m_e r_e$, толщина слоя $h_а$, которые используются для определения данных входного вектора модели нейро-нечеткой САК плотности, собираются через пользовательский интерфейс перед началом процесса уплотнения. Цикл обработки данных (рис. 3) начинается со сбора данных напряжения из акселерометра со встроенной электроникой стандарта ICP (*англ.* Integrated Circui-Piezoelectric) пьезоэлектрического IEPE, с устройством регистрации данных DAQ (*англ.* Data Acquisition), пропорциональных значениям канала вертикального ускорения.

Введем обозначения: f_d – частота дискретизации системы IEPE DAQ; N – количество выборок данных, отобранных для обработки с заданной частотой отбора проб.

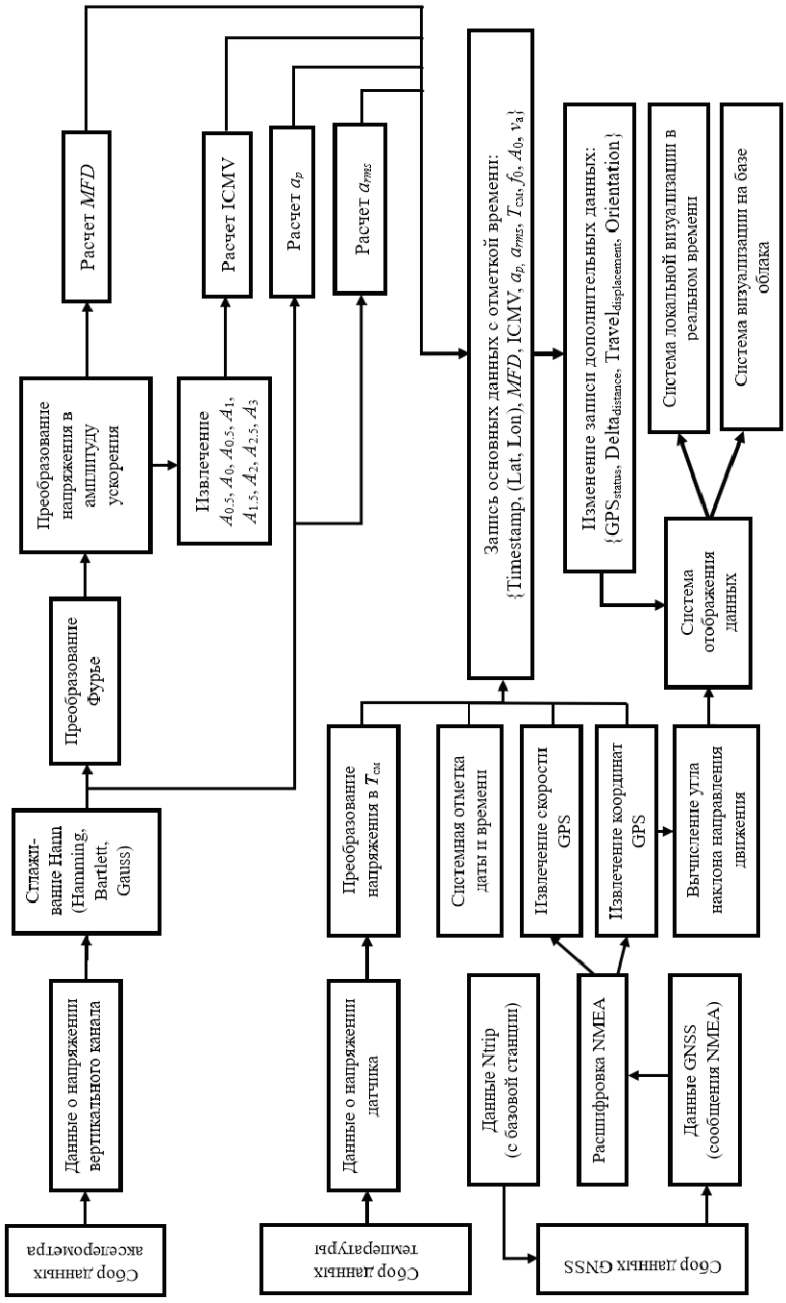


Рис. 3. Конвейер обработки данных

Массивы данных о напряжении, собранные для вертикального канала ускорения, можно представить моделью

$$U(i) = \{u_1, u_2, u_3, \ldots, u_i, \ldots, u_N\},$$

где $i \in \mathbb{Z}^+$ –вертикальная составляющая ускорения.

В реальных динамических системах в полученных выборках сигналов могут появляться спектральные утечки, что приводит к погрешности измерения переменных. Согласно известной в теории сигналов теореме Котельникова (в зарубежной литературе встречается название «теорема Шеннона» или «теорема Найквиста», «теорема отсчетов»): «непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно *абсолютно точно* представить набором его отдельных значений («отсчетов»), следующих с равными интервалами, при условии, что частота следования этих отсчетов, как минимум, вдвое превышает верхнюю границу спектра указанного сигнала» [6]. Для минимизации влияния спектральной утечки в начале и конце окна выборки сигнал сглаживают его плавным уменьшением до нуля. Наиболее часто при решении практических задач используются окна Хэмминга, Ханна, Кайзера, а также комбинированные: Кайзера–Бесселя, Блэкмана–Харриса и др. [7].

Процедура сглаживания к сигналу напряжения акселерометра выполняется перед следующим шагом обработки данных – преобразованием Фурье. Эта процедура уменьшает спектральную утечку, обеспечивая более точную идентификацию фактических частотных составляющих при выполнении преобразования Фурье для полигармонического периодического сигнала. Предложено для сглаживания временной последовательности использовать окна Ханна или Хэмминга, Бартлетта.

Рассмотрим процесс сглаживания на базе функции окна Ханна, выбор которого обусловлен несколькими особенностями:

– для минимизации влияния спектральной утечки в начале и конце окна выборки сводит данные к нулю с обоих концов, что особенно важно для данных акселерометра;

– обеспечивает оптимальный баланс при сборе частотных данных;

– хорошо сглаживает данные временных последовательностей с короткими, внезапными скачками, что характерно для сигналов акселерометров.

Окно Ханна задается выражением

$$\begin{aligned}
&w(n) = \sin^2(\pi n) = 0{,}5(1 - \cos(2\pi n / N)),\ n \in [0;1],\\
&w(n) = 0,\ n \in (-\infty;0) \cup (1;\infty),\\
&x(n) = w(n) \cdot (U(n)/U_{\max}),\ n \in [0;N],\ U_{\max} = \max(U(n)).
\end{aligned}$$

Прямое дискретное преобразование Фурье (**ДПФ**) можно представить выражением

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\, \mathrm{e}^{-jkn\left(\frac{2\pi}{N}\right)},\ k = \overline{0 \ldots N-1},\ n = \overline{0 \ldots N-1},$$

где $X(k)$ – частотный выход ДПФ в k-й точке спектра; k – индекс ДПФ в частотной области; N – количество отсчетов дискретного сигнала; $x(n)$ – отсчет n во временной области; n – временной индекс; j – мнимая единица, $j^2 = -1$.

Коэффициенты ДПФ $X(k)$ – это коэффициенты разложения в ряд Фурье периодического импульсного сигнала, площади импульсов которого равны $x(n)$. Для перехода от номера спектральной составляющей к абсолютному значению частоты воспользуемся формулой

$$f_k = (k\, f_d)/N,$$

где f_k – частота k-й составляющей спектра сигнала; f_d – частота выборок сигнала; N – количество выборок сигнала, используемых для получения спектра.

Значения $X(k)$ содержат вещественную и мнимую компоненты, соответствующие спектру анализируемого сигнала,

$$X(k) = X_{\mathrm{Re}}(k) + j\, X_{\mathrm{Im}}(k).$$

Для их преобразования в амплитудный и фазовый спектры используются следующие выражения:

$$A_k = \sqrt{X_{\mathrm{Re}}^2(k) + j\, X_{\mathrm{Im}}^2(k)};$$

$$\varphi_k = \mathrm{arctg}\left(\frac{X_{\mathrm{Im}}(k)}{X_{\mathrm{Re}}(k)}\right) = \frac{1}{\mathrm{tg}\left(X_{\mathrm{Im}}(k)/X_{\mathrm{Re}}(k)\right)},$$

где A_k – амплитуда k-й спектральной составляющей спектра; φ_k – фаза k-й спектральной составляющей спектра.

Спектр мощности

$$P(k) = A_k^2 = X_{\mathrm{Re}}^2(k) + j\, X_{\mathrm{Im}}^2(k).$$

Далее амплитуду необходимо скорректировать, умножив ее на коэффициент компенсации окна Ханна. Амплитуды напряжения преобразуются в значения ускорения умножением их на постоянную акселерометра

$$X_f(k) = 2H_k A_{\mathrm{accel}} V_{\max} \frac{\sqrt{X_{\mathrm{Re}}^2(k) + j\, X_{\mathrm{Im}}^2(k)}}{N},$$

где H_k – коэффициент компенсации окна Ханна; A_{accel} и $V_{\max}$ – постоянные величины.

Параметр A_{accel} является постоянным для данного датчика акселерометра и преобразует значения напряжения в значения ускорения. Индекс основной частоты A_0 определяется по максимальному значению $X_f(k)$

$$A_0 = \max([X_f(k); k = 0, 1, 2, ..., \max(k)]).$$

Индекс ячейки пиковой частоты δ квадратично интерполируется для точного расчета основной частоты f_0:

$$\delta = \frac{2\left(2X_f(k_{a_0}) - X_f(k_{a_0} - 1) - X_f(k_{a_0} + 1)\right)}{X_f(k_{a_0} + 1) - X_f(k_{a_0} - 1)},$$

$$f_0 = \left(k_{a_0} + \delta\right) f_d / N.$$

где k_{a_0} – индекс частотного диапазона A_0.

Далее частоты и амплитуды гармоник вычисляются с использованием основной частоты f_0

$$k_i = (i\, f_0\, N)/f_d + 0{,}5,$$

где $i \in \{0{,}5;\ 1;\ 1{,}5;\ 2;\ 2{,}5;\ 3\}$; k_i округляется в большую сторону до ближайшего положительного целого числа $k_i \in \mathbb{Z}^+$

$$A_i = X_{f_d}(k_i),\ f_i = \frac{k_i}{N} f_d,$$

где A_i и f_i – частоты гармоник и амплитуды ускорения соответственно.

В предложенной системе частота дискретизации IEPE DAQ равна $R = 1$ кГц, а количество записанных проб $N = 1000$. Параметр N является переменной, вводимой в пользовательском интерфейсе платформы. После обработки исходных значений в значимые данные следующим шагом является вычисление различных показателей ICMVs.

Расчет параметров измерения уплотнения.

В цикле обработки данных первое значение, которое вычисляется на основе обработанных исходных данных ускорения, показатель MFD (*англ.* Modified Fundamental Distortion), учитывающий все доступные частотные диапазоны. Он показывает степень искажения основной частоты (заданной величины возбуждения вибрации плиты рабочего органа АУ) другими вибрациями и гармониками.

Платформа САКП вычисляет показатели ICMVs в частотной области – CCV (*англ.* Compaction Control Value), CMV (*англ.* Compaction Meter Value), THD (*англ.* Total Harmonic Distortion), AICV (*англ.* Acceleration Intelligent Compaction Value), а также во временной области – среднеквадратичное значение ускорения вибрационной плиты a_{rms}, максимальное абсолютное значение ускорения вибрационной плиты a_p.

Определение данных о координатах.

Исходные данные, получаемые из системы GNSS платформы САКП, включают координаты GPS – широту (*англ.* Latitude (**Lat**)), долготу (*англ.* Longitude (**Lon**)) и скорость v_a, м/мин, движения АУ. В перспективе разработки планируется генерирование 2D-массива для отображения измеренных параметров (ICMV, температуры и толщины слоя) на основе их координат широты и долготы, где каждый индекс в массиве соответствует определенному пикселю на карте. Это позволит визуализировать и анализировать данные в конкретных географических координатах. Постоянные высоты и ширины каждой зоны уплотнения определяются граничными координатами области карты.

Оценка пути передвижения, продольного профиля и высоты автомобильной дороги, а также режима передвижения по скорости базируется на их регистрации по сигналам GNSS приемника и последующих математических преобразованиях. Используется соответствие параметра скорости v_a пройденному пути ($\Delta l = v_a f$) в единицу времени с учетом частоты квантования данных и суммирования их значений из-за более высокой точности этого параметра (0,05 м/с). Собранные данные сохраняются в виде записей с отметками времени и сохраняются в формате файла *.csv при последующем анализе для отображения качества и равномерности уплотнения дорожного материала.

Программное обеспечение САКП.

Программное обеспечение САКП «paver control» разработано с использованием языка программирования Python. Платформа ИПАУ имеет структурированную локальную иерархию сохранения данных в формате *.csv. Каждая запись данных передается в облачную среду в режиме реального времени для резервного копирования и дальнейшего анализа.

Полевое испытание компонентов САКП.

Разработанная инновационная платформа САКП представляет систему, обеспечивающую непрерывный прием, конвейерную обработку, анализ и визуализацию данных переменных. Построен прототип платформы САКП в составе компонентов, измеряющих сигналы ускорения вибрационной плиты рабочего органа АУ, примененный в полевых испытаниях в процессе строительства дорожных АБ-покрытий (рис. 4).

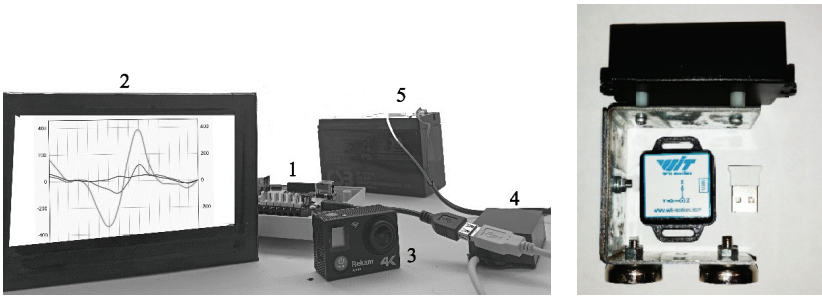
Платформа САКП имеет сенсорный дисплей, который позволяет оператору АУ в режиме реального времени получать информацию о плотности АБ-смеси во время уплотнения. Веб-инструмент используется для удаленного мониторинга качества уплотнения. Датчики подключаются к устройству САКП с использованием коаксиальных разъемов BNC (*англ.* Bayonet Neill Concelman), а платформа одноплатного компьютера обеспечивает порт мультимедийного интерфейса высокой четкости HDMI для внешнего монитора и несколько портов универсальной последовательной шины USB для передачи данных и подключения периферийных устройств. Платформа САКП выполнена в модульной форме, что позволяет дооборудовать ее новыми модулями. Результаты полевых экспериментов отражали изменения показателей в слое уплотняемого материала при различных рабочих режимах АУ, прогнозирование плотности АБ-смеси системой САКП – удовлетворительное, ошибка составила меньше 10 %.

Программное обеспечение САКП сохраняет как исходные, так и обработанные данные для дальнейшего анализа в локальной памяти устройства и передает их в облачный сервер в режиме реального времени для удаленного мониторинга и резервного копирования. Значения ICMV, температуры поверхности и MFD, ускорения, полученные платформой САКП в полевых испытаниях изменялись в зависимости от рабочих режимов АУ. Полученные данные продемонстрировали эффективность платформы САКП при сравнительном анализе показателей ICMV. Полевое испытание компонентов платформы САКП показало удовлетворительные результаты корреляции между изменениями плотности АБ-смеси и данными показателей ICMV.

Следует отметить, что разработанное аппаратное и программное обеспечение и аналитика нуждаются в дальнейшей доработке на основе полевых испытаний, проведенных на различных АБ-смесях и толщинах слоев.

Карты показателей интеллектуального уплотнения ICMVs с цветовой кодировкой зоны уплотнения могут быть использованы для анализа:

– участков неравномерного уплотнения (в случае неравномерного уплотнения слоя материала может потребоваться дополнительное уплотнение дорожными катками для достижения желаемой уплотненности);



а) *б*)

Рис. 4. Технические средства автоматизации САКП:
а – комплект (*1* – одноплатный компьютер; *2* – панель монитор; *3* – камера с защитой; *4* – преобразователь напряжения; *5* – аккумулятор 12 В); *б* – акселерометр Wit Motion и мощные магниты для закрепления на виброплите АУ

– исторических данных, которые можно использовать для сравнения с текущими результатами плотности;

– уплотненности слоя, что позволяет рационально изменять режимные параметры рабочего органа АУ в целях достижения желаемой плотности.

В дальнейшем будет разработана система с расширенной аналитикой для обеспечения контроля плотности с учетом заданной производительности, необходимой для интеллектуального строительства дорожных покрытий в соответствии с концепцией четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0).

Заключение

Предложено изменение в форме дополнения к п. 5.5 стандарта КГКУ «КрУДор» СТО 01-2020 (с изменением № 2), позволяющее при разработке документа «Технологическая схема потока» правильно формировать составы звеньев дорожных машин с учетом наличия АУ и дорожных катков, оснащенных САКП/САУП, в целях улучшения качества дорожных покрытий автомобильных дорог и повышения производительности уплотнения АБ-смесей.

Разработаны программно-аппаратные средства САКП для АУ на базе предложенной архитектуры конвейера обработки данных CI/CD (CI – *англ.* Continuous Integration – непрерывная интеграция, CD – *англ.* Continuous Delivery – непрерывная поставка), обеспечивающей высокую эффективность системы.

Подтверждена работоспособность САКП для АУ с компонентами измерения ускорения вибрационной плиты в полевых условиях строительства АБ-покрытия автомобильной дороги в пригороде г. Красноярска. Результаты полевого испытания удовлетворительные, средняя относительная ошибка вычисленных значений плотности АБ-смеси составила меньше 10 %.

Список литературы

1. Кустарев, Г. В. Высокоэффективные комплексы для скоростного строительства асфальтобетонных покрытий : монография / Г. В. Кустарев, С. А. Павлов, А. В. Ушков. – М. : МАДИ, 2019. – 140 с.

2. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning / Y. Wang, J. Li, X. Zhang, Y. Yao, Y. Peng // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 9. – P. 2777. doi: 10.3390/s24092777

3. A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements / S. Sivagnanasuntharam, A. Sounthararajah, J. Ghorbani, D. Bodin, J. Kodikara // Road Materials and Pavement Design. – 2023. Vol. 24, No. 1. – P. 1 – 30. doi: 10.1080/14680629.2021.2015423.

4. Правила разработки и оформления проектов производства работ на капитальный ремонт и ремонт автодорог. СТО 01-2020. – Красноярск : КГКУ «КрУДор», 2020. – 13 с. – URL : https://krudor.ru/upload/iblock/1ab/1abdae424f968e9c7ffc524091c4c9b9.pdf (дата обращения: 18.03.2025)

5. Hapke, H. Building Machine Learning Pipelines / H. Hapke, C. Nelson. – Sebastopol, CA : O'Reilly Media, Inc., 2020. – 366 p.

6. Жмудь, В. А. Теорема Котельникова–Найвиста–Шеннона, принцип неопределенности и теория относительности / В. А. Жмудь // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1(7). – С. 127 – 136.

7. Гришенцев, А. Ю. Цифровые системы широкополосной связи. Часть 2. Оконные и вейвлет-функции и преобразования / А. Ю. Гришенцев, А. Г. Коробейников, С. А. Арустамов. – СПб. : Университет ИТМО, 2019. – 42 с.

On the Question of Constructing an Intelligent System of Density Control for Asphalt Pavers Based on Software and Hardware Using a Data Conveyor

A. P. Prokopyev✉

Department of Construction Materials and Construction Technologies, prok1@yandex.ru; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Keywords: asphalt paver; intelligent compaction; data analysis pipeline; machine learning; continuous density control; software and hardware.

Abstract: Continuous quality control of asphalt concrete mixture compaction during road construction using intelligent compaction technology is based on acceleration sensors installed on vibratory rollers of road rollers. The paper presents options for increasing the efficiency of density control during operation of a link of automated road machines based on the use of a continuous control system for an asphalt paver, including by ensuring a higher degree of compaction, as well as optimizing the link of road rollers and reducing the cost of road surfaces. It is proposed to develop hardware and software for pavers taking into account the concept of its life cycle. The system provides for processing variable data based on approaches used in the development of machine learning pipelines. A version of a data pipeline and an algorithm for processing variables in an intelligent density control system for pavers are shown.

References

1. Kustarev G.V., Pavlov S.A., Ushkov A.V. *Vysokoeffektivnyye kompleksy dlya skorostnogo stroitel'stva asfal'tobetonnykh pokrytiy: monografiya* [Highly Efficient Complexes for High-Speed Construction of Asphalt Concrete Pavements: monograph], Moscow: MADI, 2019, 140 p. (In Russ.)

2. Wang Y., Li J., Zhang X., Yao Y., Peng Y. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 9, 2777. doi: 10.3390/s24092777

3. Sivagnanasuntharam S., Sounthararajah A., Ghorbani J., Bodin D., Kodikara J. A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements, *Road Materials and Pavement Design,* 2023, vol. 24, no. 1, p. 1-30. doi: 10.1080/14680629.2021.2015423

4. Available at: https://krudor.ru/upload/iblock/1ab/1abdae424f968e9c7ffc524091c4c9b9.pdf (accessed 18 March 2025).

5. Hapke H., Nelson C. *Building Machine Learning Pipelines*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2020. 366 p. ISBN: 9781492053194

6. Zhmud V.A. [Kotelnikov-Nayvist-Shannon theorem, the principle of uncertainty and the theory of relativity], *Avtomatika i programm-naya inzheneriya* [Automation and software engineering], 2014, no. 1(7), pp. 127-136. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G., Arustamov S.A. *Tsifrovyye sistemy shirokopolosnoy svyazi. Chast' 2. Okonnyye i veyvlet-funktsii i preobrazovaniya* [Digital broadband communication systems. Part 2. Window and wavelet functions and transformations], St. Petersburg: ITMO University, 2019, 42 p. (In Russ.)

Zum Aufbau eines intelligenten Verdichtungskontrollsystems für Asphaltfertiger auf der Basis von Hardware und Software unter Verwendung einer Datenpipeline

Zusammenfassung: Die kontinuierliche Qualitätskontrolle der Verdichtung von Asphalt-Beton-Gemischen beim Autobahnbau mittels intelligenter Verdichtungstechnik basiert auf Beschleunigungssensoren, die an vibrierenden Walzen von Straßenwalzen installiert sind. Es sind die Varianten zur Erhöhung der Effizienz der Verdichtungskontrolle beim Betrieb einer Kette automatisierter Straßenbaumaschinen auf der Grundlage der Verwendung des kontinuierlichen Steuerungssystems für Asphaltfertiger vorgestellt, u. a. durch die Erzielung eines höheren Verdichtungsgrades sowie die Optimierung einer Kette von Straßenwalzen und die Senkung der Kosten für Straßenbeläge. Es ist die Konstruktion von Hard- und Software für Straßenfertiger vorgeschlagen, wobei das Konzept des Lebenszyklus berücksichtigt wird. Das System sieht eine variable Datenverarbeitung auf der Grundlage von Ansätzen vor, die bei der Entwicklung von Pipelines für maschinelles Lernen verwendet werden. Die Variante der Datenpipeline und der Algorithmus der variablen Datenverarbeitung im intelligenten Dichtesteuerungssystem für Straßenfertiger sind gezeigt.

Sur la question de la construction d'un système intelligent de contrôle de la densité pour les pavés a la base du système logiciel et matériel utilisant un pipeline de données

Résumé: Le contrôle continu de la qualité du compactage des mélanges d'asphalte lors de la construction de routes, la technologie de compactage intelligent sont basés sur des capteurs d'accélération installés sur les rouleaux vibrants des rouleaux de route. Sont présentées des options pour améliorer la gestion de la densité dans le cadre de véhicules routières automatisées grâce à l'utilisation d'un système de contrôle continu pour le finisseur, notamment en améliorant le compactage, en optimisant le compactage des rouleaux et en réduisant le coût des chaussées. Est proposé de construire un matériel et un logiciel pour les empileurs en tenant compte du concept de son cycle de vie. Le système prévoit le traitement des données de l'évolution sur à base des approches utilisées dans la conception des pipelines d'apprentissage automatique. Sont présentés l'option de pipeline de données et l'algorithme de traitement des changements dans le système intelligent de contrôle de la densité pour les empileurs.

Автор: ***Прокопьев Андрей Петрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и технологии строительства», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

УДК 65.012.122
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.212-222

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ТИПОВ

А. М. Пахомов✉, В. В. Конкина

Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», pahomoff.artiom2016@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: единичное и мелкосерийное производство; календарное планирование; метод Джонсона; метод Петрова–Соколицына; производственный процесс.

Аннотация: Актуальность задачи календарного планирования производства единичного и мелкосерийного типа обусловлена необходимостью повышения оптимальности планов и общей производительности предприятий, снижения перерасхода ресурсов и задержек в поставках. Исследования направлены на разработку системы календарного планирования производственных процессов. Реализован расчет норм выполнения изделий в смену для некоторых операций предприятий, занимающихся изготовлением игрушек из полимерных материалов. Рассмотрены методы оптимизации планирования производства, такие как методы Петрова–Соколицына и Джонсона. Сформулирована задача определения оптимальной очередности выполнения изделий. Решена поставленная задача методами Петрова–Соколицына и Джонсона.

Введение

Календарное планирование производственных процессов – это элемент оперативно-производственного планирования, который направлен на осуществление календарного распределения плана производства продукции предприятием и его подразделением. В основе календарного плана лежит производственная программа предприятия и месячные оперативные планы производства [1]. Исходя из данных о поступивших заказах и характеристиках изделий, планируется порядок их выполнения на каждой из операций.

Системы календарного планирования производственных процессов позволяют уменьшить простои оборудования и рабочих, что в свою очередь увеличивает производственную мощность предприятия. Внедрение автоматизированных систем планирования в долгосрочной перспективе приводит к минимизации затрат и простоев, позволяет более эффективно распределять ресурсы, улучшает качество продукции, а также уменьшает время выполнения заказов.

Задача автоматизации календарного планирования особенно актуальна для предприятий мелкосерийного и единичного типов производств. Ввиду большого количества выпускаемой продукции, а также постоянного появления и запуска новых изделий на предприятиях этих типов производств возникают проблемы с расчетом и прогнозированием их норм времени, что в свою очередь препятствует планированию и диспетчированию производственных процессов. На предприятиях данных типов в зависимости от структуры заказов может меняться «узкое

место», то есть рабочее место, участок, цех, ограничивающие производительность всего предприятия. В связи с этим становится важной задача оперативного перераспределения трудовых ресурсов [2 – 4].

На предприятиях мелкосерийного и единичного типов производств остро встает вопрос об оптимальной последовательности запуска. Ее определение усложняется тем, что план охватывает множество разных изделий, имеющих отличающиеся трудоемкости на разных операциях [5, 6].

Цель работы – автоматизация и оптимизация календарного планирования производственных процессов предприятий единичного и мелкосерийного типов производства.

Материалы и методы

Процедура поиска очередности используется для определения оптимального порядка выполнения заданий или клиентов сервисных систем через последовательность обрабатывающих или обслуживающих устройств.

В случае производственной системы задача формулируется более знакомо: требуется отыскать оптимальный порядок запуска ряда партий деталей в обработку на предметно-замкнутом участке (**ПЗУ**), где над ними выполняется некоторая последовательность операций. Информацией, необходимой для решения этой задачи, является время, затрачиваемое на каждой операции для обработки или изготовления изделия, а также последовательность операций для каждого изделия.

На предприятиях мелкосерийного и единичного типов производств при расчете и прогнозировании норм времени выполнения изделий возникают трудности из-за постоянного появления новых продуктов. Вследствие чего, были разработаны формулы на примере предприятия, изготавливающего игрушки из полимерных материалов, благодаря которым удастся справиться с возникшими проблемами.

Объем производства в смену на литье

$$V_{\text{tpa}} = \frac{G_{\text{tpa}}\, 0,01\left(100\% - P_{\text{бр}}\right)\text{Ef}}{C_{\text{авт}} + C_{\text{изв}}}, \tag{1}$$

где G_{tpa} – гнездность пресс-формы (число изделий на одной пресс-форме), шт.; $P_{\text{бр}}$ – средний процент брака литьевого цеха, %; Ef – эффективный фонд времени в смену, с; $C_{\text{авт}}$, $C_{\text{изв}}$ – цикл автоматической работы станка при изготовлении изделия и цикл извлечения изделия из станка соответственно, с.

Ввиду существенных колебаний норм времени выполнения изделий на операции окраса, для их прогнозирования каждому изделию сопоставлено базовое изделие, наиболее похожее по типу окрашивания. Также при прогнозировании в расчет берется периодическая работа на данной операции. Периодическая работа – работа, выполняемая не в каждом цикле выполнения изделия, а один раз на несколько циклов.

Объем производства в смену на окрасе изделия

$$V_{\text{окр}} = \frac{\text{Ef}}{L/U + W_{\text{окр}}}, \tag{2}$$

где L – длина окраса изделия, см; U – скорость окраса базового изделия, см/с; $W_{\text{окр}}$ – периодическая работа на операции окраса изделия, с.

Объем производства в смену на окрасе глаз изделий

$$V_{\text{гл}} = \frac{\text{Ef}}{T_{\text{гл}} + W_{\text{гл}}}, \tag{3}$$

где $T_{гл}$ – норма времени на операции окраса глаз, с; $W_{гл}$ – периодическая работа на операции окраса глаз, с.

Объем производства в смену на тампопечати

$$V_{тамп} = \frac{\mathrm{Ef}}{T_{тамп} + W_{тамп}}, \tag{4}$$

где $T_{тамп}$ – норма времени на операции тампопечать, с; $W_{тамп}$ – периодическая работа на операции тампопечати, с.

Норма выполнения изделий в смену на запайке

$$V_{зап} = \frac{G_{зап} 0,01\left(100\% - P_{бр}\right)\mathrm{Ef}}{C_{авт} + C_{изв}}, \tag{5}$$

где $G_{зап}$ – гнездность запайщика, шт.

Время изготовления изделий T, с, одного вида на какой-либо операции

$$T = \frac{T_с N}{V}, \tag{6}$$

где $T_с$ – количество секунд в смене; N – количество изделий, шт.; V – норма выполнения изделий в смену, шт.

Задача определения очередности в статической постановке с критерием минимума совокупной длительности цикла имеет несколько хорошо известных из практики вариантов, когда n заданий должны пройти в одинаковом порядке две, три и m операций.

Простой и точный способ отыскания оптимального порядка запуска партий в обработку существует только для двух операционных ПЗУ. Он предложен английским ученым Джонсоном в 1954 году. Для трех операционных ПЗУ точный метод также существует, однако он достаточно сложен. Для многооперационных ПЗУ доказано, что точного метода не существует. Для них разработано большое число приближенных методов, среди которых общеизвестны методы, предложенные в работах [7, 8]. Приближенные методы позволяют все множество вариантов порядка запуска свести к нескольким вариантам, среди которых с большой долей вероятности находится оптимальный. Наиболее простым и употребительным из них до сих пор является метод Петрова–Соколицына.

Постановка задачи оптимизации запуска партий в обработку предполагает также, что время переналадки оборудования с одной партии на другую невелико и примерно одинаково для любого их чередования на ПЗУ [9 – 11]. Если это допущение не выполняется, то указанные методы не работают.

Рассмотрим метод Джонсона. Пусть $N = \{1, 2, \ldots, n\}$ – множество работ, которые выполняются на m машинах, $m = 2$, каждая из которых имеет свой номер; пусть t_{ij} – время выполнения i-й работы на j-й машине. Время простоя вычисляется по формуле

$$\max\left(t_{11}, t_{11} + t_{21} - t_{12}, t_{11} + t_{21} + t_{31} - t_{11} - t_{21}, \ldots, \sum_{i=1}^{n} t_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} t_{j2}\right), \tag{7}$$

где t_{i1}, t_{j2} – время выполнения работы на первой и второй машинах соответственно; n – число выполняемых работ.

Требуется так организовать выполнение работ, чтобы суммарное время простоя машин оказалось минимальным. Сначала выбираются детали, у которых время выполнения первой операции короче времени выполнения второй операции. Эти детали обрабатываются в порядке возрастания времени выполнения первой операции. Остальные детали обрабатываются в порядке убывания времени

выполнения второй операции. Каждая работа состоит из двух операций с длительностями a_i и b_i, минимизируется общее время обслуживания работ в следующей последовательности: запускаются работы, для которых $a_i \le b_i$ в порядке неубывания a_i; затем – для которых $a_i > b_i$ в порядке невозрастания b_i (тем самым минимизируем простои второй машины из-за того, что первая еще не успела обработать какую-либо операцию).

Доказана оптимальность такой последовательности. Однако на случай $n > 2$ результаты не распространяются. Анализируя алгоритм Джонсона для задачи о двух станках, можно извлечь из него рекомендации, применимые и к общему случаю последовательной обработки деталей на станках при произвольном m:

1) в обработку сначала запускают детали, требующие минимального времени обработки на первом станке в порядке возрастания этого времени;

2) в обработку запускаются сначала детали, требующие максимального времени обработки на последнем станке в порядке убывания этого времени;

3) в обработку запускаются сначала детали, у которых узкое место находится дальше от начала процесса обработки (узким местом для данных деталей называется станок, на котором их обработка занимает наибольшее время);

4) обрабатываются вначале детали, у которых суммарное время обработки на всех станках максимальное в порядке убывания этого времени;

5) пятый метод решения этой задачи основан на усреднении результатов решения задачи по четырем известным рекомендациям.

Каждое из вышеописанных обобщений алгоритма Джонсона в определенных условиях имеет свои преимущества и недостатки. Применение первого метода способствует скорейшему вовлечению в обработку второго станка; второй – позволяет уменьшить конечный простой первого станка; третий – способствует наиболее быстрому «проскакиванию» к концу технологической линии тех деталей, для которых обработка на первом станке занимает меньшее время с тем, чтобы освободить первый станок деталям, для которых он является узким местом. Однако данные методы не совместимы друг с другом: последовательность обработки, найденная с использованием одного из них, не соответствует последовательности, полученной по другим.

Для оптимальной расстановки изделий на операции при их количестве, большем двух, зачастую применяется метод Петрова–Соколицына, при котором оптимальная последовательность работ будет наблюдаться в одном из случаев распределения работ в порядке:

1) возрастания суммарного времени выполнения от первой до предпоследней операции;

2) убывания суммарного времени выполнения от второй до последней операции;

3) убывания разницы между временем выполнения на последней и первой операции.

Таким образом, все множество вариантов запуска партий в обработку $K_д$ сводится к трем вариантам, среди которых, скорее всего, и определяется оптимальный. Если среди упорядочиваемых элементов находятся одинаковые, то количество вариантов возрастает. Поиск лучшего варианта из отобранных проводится прямым перебором [12]. С этой целью для каждой из последовательностей запуска должно быть найдено время $T_{сц}$ и проведен выбор последовательности, минимизирующей данную величину. Оптимальных последовательностей может быть и несколько с равными значениями $T_{сц}$. Расчет времени $T_{сц}$ выполняется с помощью графической либо математической модели (цепной метод расчета).

Расчет времени $T_{сц}$ происходит по формуле

$$T_{ij} = t_{ij} + \max\left(T_{i-1,j}, T_{i,j-1}\right), \tag{8}$$

где t_{ij} – время выполнения работы i на операции j, с; T_{ij} – время завершения работы i на операции j, с; $T_{сц}$ является T_{ij} при последней итерации, то есть при i равной k_1, а j равной k_2.

В конце на основе общего выполнения работ выбирается оптимальный способ расстановки

$$f\left(K_{д}\right) \to \min , \tag{9}$$

где $f\left(K_{д}\right)$ – функция, возвращающая $T_{сц}$.

Результаты и их обсуждение

Исходные данные, в которых содержится информация о времени выполнения семи операций для двенадцати деталей (вариант № 1) и четырех операций для десяти деталей (вариант № 2), представлены на рис. 1; диаграммы Ганта для последовательностей, распределенных методами Джонсона и Петрова–Соколицына, – рис. 2.

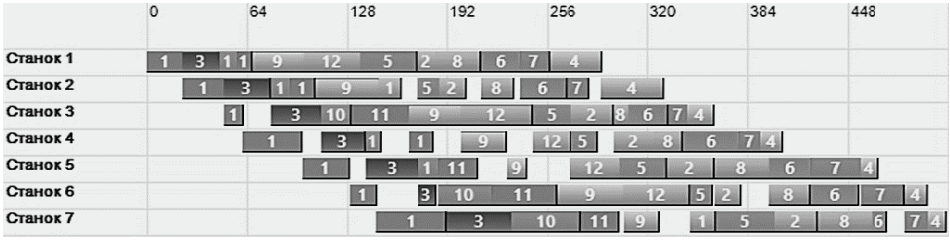
Детали	Станок 1	Станок 2	Станок 3	Станок 4	Станок 5	Станок 6	Станок 7
Деталь 1	54	65	8	23	45	32	98
Деталь 2	18	38	86	35	2	97	29
Деталь 3	68	61	4	2	75	59	82
Деталь 4	92	79	14	90	2	22	52
Деталь 5	88	35	94	1	5	41	12
Деталь 6	75	63	2	14	28	32	3
Деталь 7	57	19	31	8	95	67	13
Деталь 8	86	77	65	59	95	82	62
Деталь 9	96	94	33	43	11	47	31
Деталь 10	3	92	35	97	56	18	93
Деталь 11	99	3	89	47	27	79	35
Деталь 12	61	84	83	7	55	39	2

а)

Детали	Станок 1	Станок 2	Станок 3	Станок 4
Деталь 1	54	65	8	23
Деталь 2	18	38	86	35
Деталь 3	68	61	4	2
Деталь 4	92	79	14	90
Деталь 5	88	35	94	1
Деталь 6	75	63	2	14
Деталь 7	57	19	31	8
Деталь 8	86	77	65	59
Деталь 9	86	94	33	43
Деталь 10	3	92	35	97

б)

Рис. 1. Информация о времени выполнения операций, мс, для вариантов № 1 (*а*) и № 2 (*б*)



а)

б)

Рис. 2. Диаграммы Ганта для методов Джонсона (*а*) и Петрова–Соколицына (*б*)

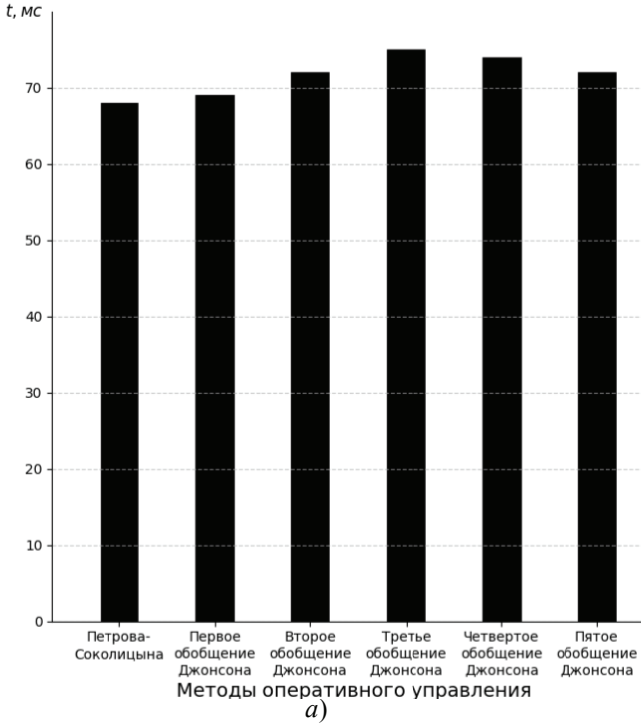
Проведем исследование эффективности методов оперативного управления с исходными данными: 6 станков, 6 деталей. Каждым реализованным методом было рассчитано по 50 технологических процессов со временем обработки:

1) малым (1…10 усл. ед.);

2) длительным (10…100 усл. ед.);

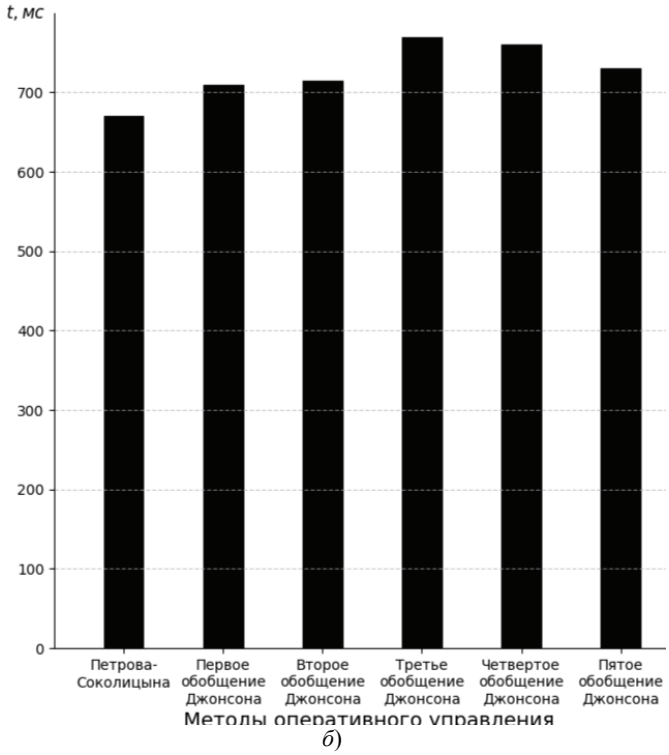
3) комбинированным (1…100 усл. ед.).

На рисунке 3 представлены гистограммы, показывающие среднее время длительности технологического цикла при малом, длительном и комбинированном времени технологической обработки для каждого метода.

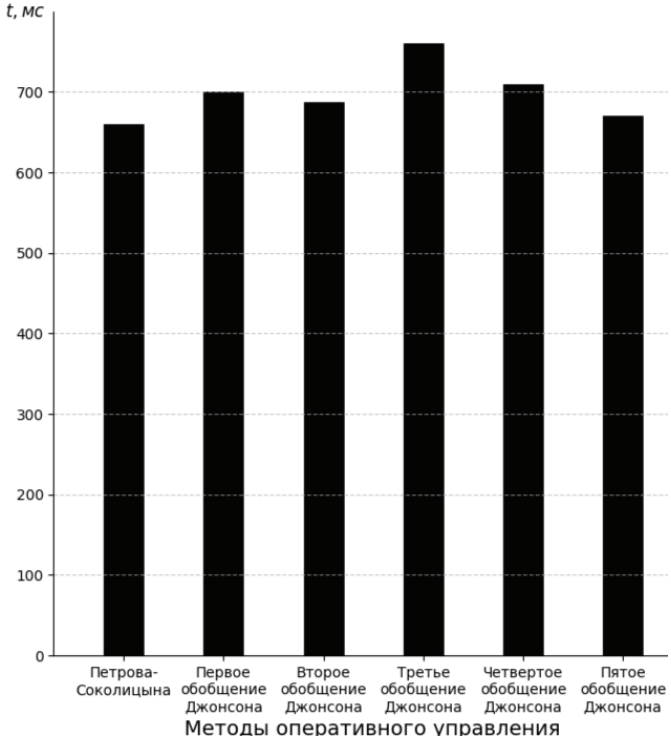


а)

Рис. 3. Гистограммы, показывающие среднее время длительности технологического цикла при малом (*а*) времени технологической обработки для каждого метода (начало)



б)



в)

Рис. 3. При длительном (*б*) и комбинированном (*в*) времени технологической обработки для каждого метода (окончание)

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что по критерию оптимальности – минимизации длительности технологического цикла, самым эффективным методом оперативного управления является метод Петрова–Соколицына, однако данный метод не так эффективен по другим критериям оптимальности, например, минимизации простоя станков. Обобщения Джонсона эффективней по другим критериям оптимальности. Применение *первого* из них способствует скорейшему вовлечению в обработку второго станка; *второй* – позволяет уменьшить конечный простой первого станка; *третий* – способствует наиболее быстрому «проскакиванию» к концу технологической линии тех деталей, для которых обработка на первом станке занимает меньшее время с тем, чтобы освободить первый станок деталям, для которых он является узким местом.

Обобщения Джонсона эффективней для минимизации простоя станков, но длительность технологического цикла в таком случае возрастает.

По времени расчета методов при малом количестве деталей (до 10) все методы примерно одинаковы – 4…15 мс. При большом количестве деталей (до 100) эффективней метод Петрова–Соколицына – 15…50 мс. При большом количестве деталей время расчета обобщений Джонсона больше 50 мс.

Заключение

Рассмотрен вопрос разработки системы календарного планирования производственных процессов для предприятий мелкосерийного и единичного типов производства, разработаны формулы норм выполнений изделий для некоторых операций производства игрушек из полимерных материалов. Представлены методы оптимизации планирования, среди которых выбран наиболее эффективный по критерию минимизации длительности технологических процессов – метод Петрова–Соколицына, так как сокращение общего времени выполнения заказов особенно важно для предприятий с высокой изменчивостью номенклатуры и объемов выпуска продукции, что характерно для мелкосерийного производства.

Список литературы

1. Бабич, Т. Н. Планирование на предприятии / Т. Н. Бабич, Э. Н. Кузьбожев. – М. : КноРус, 2017. – 336 с.

2. Вумек, Дж. П. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании : пер. с англ. / Дж. П. Вумек, Д. Т. Джонс. – 7-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2013. – 472 с.

3. Голдсби, Т. Бережливое производство и 6 сигм в логистике. Руководство по оптимизации логистических процессов / Т. Голдсби, Р. Мартиченко. – М. : Гревцов Паблишер, 2019. – 416 с.

4. Задача управления многосвязной производственной системой с использованием принципов бережливого производства / Д. Ю. Муромцев, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, А. А. Третьяков, И. А. Елизаров, В. Н. Назаров // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 6 – 16. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.006-016

5. Майстренко, А. В. Моделирование технологических установок ресурсосберегающих химико-технологических процессов на основе объектно-ориентированного подхода / А. В. Майстренко, Н. В. Майстренко // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 62 – 68

6. Интеллектуальное управление процессами технологической подготовки машиностроительного производства / А. Г. Лютов, Ю. В. Рябов, Р. И. Шайдуллин,

И. И. Шамбазов // Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 117 – 124. doi: 10.14529/ctcr170312

7. Бухалков, М. И. Планирование на предприятии : учебник / М. И. Бухалков. – 4-е изд., испр. – М. : ИНФРА-М, 2023. – 416 с.

8. Горемыкин, В. А. Планирование на предприятии : учебник и практикум / В. А. Горемыкин. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2014. – 857 с.

9. Соловьев, Д. С. Метод объективизации значений весовых коэффициентов для принятия решений в многокритериальных задачах / Д. С. Соловьев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 161 – 168. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-161-168

10. Метод поиска субоптимального воздействия, обеспечивающего допустимые потери в качестве технологического процесса / Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева, Ю. В. Литовка, В. А. Нестеров // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2020. – № 5. – С. 75 – 86. doi: 10.31857/S0235711920050144

11. Модификация метода анализа иерархий для повышения объективности принимаемых решений / И. А. Соловьева, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка, И. Л. Коробова // Труды МАИ. – 2018. – № 98. – 16 с. URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_32761971_19818704.pdf (дата обращения: 15.04.2025).

12. Литовка, Ю. В. Математические методы исследования операций : учеб. электрон. изд. / Ю. В. Литовка, Н. В. Майстренко, С. Я. Егоров. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ». – 2023. – 1 электрон. опт. диск(CD-ROM). – Системные требования: ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод; 978 Kb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана. URL : https://tstu.ru/book/elib1/pdf/2023/LitovkaUV.pdf (дата обращения: 15.04.2025).

Solution to the Problem of Optimal Schedule Planning of Single and Small-Batch Production

A. M. Pakhomov✉, V. V. Konkina

Department of Automated Decision Support Systems, pahomoff.artiom2016@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: single and small-batch production; scheduling; Johnson method; Petrov-Sokolitsyn method; production process.

Abstract: The relevance of the scheduling problem of single and small-batch production is due to the need to improve the optimality of plans and the overall productivity of enterprises, reduce resource overruns and delays in deliveries. The research is aimed at developing a scheduling system for production processes. The calculation of standards to manufacture products per shift for some operations of enterprises engaged in the manufacture of toys from polymeric materials has been implemented. Methods for optimizing production planning, such as the Petrov-Sokolitsyn and Johnson methods, have been considered. The problem of determining the optimal order of production has been formulated. The problem has been solved using the Petrov-Sokolitsyn and Johnson methods.

References

1. Babich T.N., Kuzbozhev E.N. *Planirovaniye na predpriyatii* [Planning at the enterprise], Moscow: KnoRus, 2017, 336 p. (In Russ.)

2. Womack J.P., Jones D.T. *Lean Thinking. Banish waste and create wealth in your corporation*, FREE PRESS New York London Toronto Sydney Singapore, 472 p.

3. Goldsby T., Martichenko R. *Berezhlivoye proizvodstvo i 6 sigm v logistike. Rukovodstvo po optimizatsii logisticheskikh protsessov* [Lean Manufacturing and 6 sigma in Logistics. Guidelines for optimizing logistics processes], Moscow: Grevtsov Publisher, 2019, 416 p. (In Russ.)

4. Muromtsev D.Yu., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A., Tretyakov A.A., Elizarov I.A., Nazarov V.N. [The task of managing a multiconnected production system using the principles of lean production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 6-16. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.006-016 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Maystrenko A.V., Maystrenko N.V. [Modeling of process units for resource-saving chemical-technological processes based on an object-oriented approach], *Vestnik Astrakhan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computing engineering and informatics], 2017, no. 1, pp. 62-68 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Lyutov A.G., Ryabov Yu.V., Shaydullin R.I., Shambazov I.I. [Intelligent control of processes of technological preparation of mechanical engineering production], *Vestnik YuUrGU. Ser.: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika* [Bulletin of SUSU. Series: Computer technologies, control, radio electronics], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 117-124. doi: 10.14529/ctcr170312 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Bukhalkov M.I. *Planirovaniye na predpriyatii: uchebnik* [Planning at the enterprise: textbook], Moscow: INFRA-M, 2023, 416 p. (In Russ.)

8. Goremykin V.A. *Planirovaniye na predpriyatii: uchebnik i praktikum* [Planning at the enterprise: textbook and practical course], Moscow: Yurayt, 2014, 857 p. (In Russ.)

9. Solov'yev D.S. [Method of objectification of values of weighting coefficients for decision-making in multicriteria problems], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2023, vol. 23, no. 1, pp. 161-168. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-161-168 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Solov'yev D.S., Solov'yeva I.A., Litovka Yu.V., Nesterov V.A. [Method for searching for suboptimal impact that ensures acceptable losses in the quality of a technological process], *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2020, no. 5, pp. 75-86. doi: 10.31857/S0235711920050144 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Solov'yeva I.A., Solov'yev D.S., Litovka Yu.V., Korobova I.L. [Modification of the analytic hierarchy process method to improve the objectivity of decisions made], *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2018, no. 98, 16 p. available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_32761971_19818704.pdf (accessed 15 April 2025).

12. Litovka Yu.V., Maystrenko N.V., Yegorov S.Ya. *Matematicheskiye metody issledovaniya operatsiy: ucheb. elektron. izd.* [Mathematical methods of operations research: educational electronic publication], Tambov: Izdatel'skiy tsentr TGTU, 2023. available at: https://tstu.ru/book/elib1/pdf/2023/LitovkaUV.pdf (accessed 15 April 2025).

Lösung des Problems der optimalen Terminierung der Produktionsplanung von Einzel- und Kleinserienarten

Zusammenfassung: Die Dringlichkeit der Aufgabe der Kalenderplanung der Produktion von Stück- und Kleinserienfertigung ist durch die Notwendigkeit bedingt, die Optimalität der Pläne und die Gesamtproduktivität der Unternehmen zu erhöhen, den Ressourcenverbrauch und die Lieferverzögerungen zu verringern. Die Forschungen sind auf die Entwicklung des Systems der Kalenderplanung der Produktionsprozesse gerichtet. Es ist die Berechnung der Normen der Produkterfüllung pro Schicht für einige Operationen der Unternehmen, die sich mit der Herstellung der Spielzeuge aus den polymeren Materialien beschäftigen, realisiert. Es sind Methoden der Optimierung der Produktionsplanung, wie die Petrov-Sokolitsyn- und Johnson-Methode, betrachtet. Es ist das Problem der Bestimmung der optimalen Reihenfolge der Erfüllung der Produkte formuliert. Das gestellte Problem ist mit den Methoden von Petrov-Sokolitsyn und Johnson gelöst.

Solution du problème de la planification optimale du calendrier de la production des types unitaires et petits lots

Résumé: La pertinence de la tâche de planification de la production à l'unité et à petite échelle est due à la nécessité d'améliorer l'optimalité des plans et la productivité globale des entreprises, de réduire les dépassements de ressources et les retards de livraison. La recherche vise à développer un système de planification des processus de production. Est mis en œuvre du calcul des normes d'exécution des produits en remplacement de certaines opérations des entreprises engagées dans la fabrication de jouets en matériaux polymères. Sont examinées les méthodes d'optimisation de la planification de la production, telles que celles de Petrov-Sokolitsyn et de Johnson. Est formulée la tâche de déterminer l'ordre optimal d'exécution des produits. Est résolue la tâche présentée par les méthodes de Petrov-Sokolitsyn et de Johnson.

Авторы: ***Пахомов Артем Максимович*** – студент; ***Конкина Виктория Викторовна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 303.732.4
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.223-234

МОНИТОРИНГ МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИМЕРА В ПРОЦЕССЕ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ СКРЫТОЙ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ

А. А. Хвостов[1,2], И. А. Хаустов[2], С. Г. Тихомиров[2], Е. А. Битюкова✉[2]

Кафедра прикладной математики и механики (1),
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»;
кафедра информационных и управляющих систем (2),
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
eabityukova@yandex.ru; Воронеж, Россия

Ключевые слова: гель-проникающая хроматография; деструкция полимеров в растворе; молекулярно-массовое распределение; скрытые цепи Маркова; термоокислительная деструкция.

Аннотация: Предложен подход к синтезу системы контроля и управления процессом термоокислительной деструкции. Управление осуществляется на основе математической модели процесса в виде цепи Маркова и уравнений связи скрытых переменных с наблюдаемыми. В качестве наблюдаемых переменных используются инварианты молекулярно-массового распределения полимера (ММР) – средневзвешенная, среднечисленная молекулярные массы полимера и коэффициент полидисперсности. Исходными данными для системы контроля и управления является начальное состояние системы в виде ММР полимера, полученное лабораторным способом. Оценка параметров скрытой марковской цепи осуществляется по данным наблюдаемых переменных, значения которых измеряются непрерывно во времени. Непрерывный контроль средневзвешенной молекулярной массы полимера проводится любым из известных способов (например, по динамической вязкости раствора). По полученным данным рассчитаны ММР в ходе процесса деструкции.

Введение

Процессы деструкции высокомолекулярных соединений широко применяются в технологиях синтеза и переработки полимеров. Например, известен метод получения низкомолекулярных полимеров с активными функциональными группами в процессе их термоокислительной деструкции в растворе [1]. Такой подход позволяет осуществлять контролируемую деструкцию и получать продукцию заданного качества. Кроме того, процессы термоокислительной деструкции эффективны в области переработки производственного брака, а также данный вид деструкции может быть использован для разрушения сверхвысокомолекуляных полимеров, которые откладываются и накапливаются на технологическом оборудовании (полимеризаторах, трубопроводах и др.) [2].

Процесс деструкции сопровождается разрушением макромолекул и изменением структуры полимера. Главной характеристикой полимера в ходе деструкции является молекулярно-массовое распределение (**ММР**). Управление процессом деструкции заключается в поддержании необходимых режимных параметров

процесса (времени пребывания реакционной смеси в зоне реакции, температуры смеси, концентрации компонентов) и обеспечения целевого параметра – ММР. Для расчета управляющих воздействий необходима математическая модель процесса и средство непрерывного мониторинга целевого показателя качества.

Механизм деструкции полимеров представляет собой последовательность случайных событий (элементарных актов деструкции) с конечным количеством исходов. Вероятность перехода макромолекулы после акта деструкции в новое состояние (фракцию ММР) зависит только от состояния, из которого совершается переход, и не зависит от всей предыстории процесса. Для описания такого рода процессов помимо уравнений химической кинетики, статистических методов моментов, воспроизводящих функций, Монте-Карло [3 – 5] используется аппарат цепей Маркова [6, 7].

Математическая модель процесса деструкции

В работах [8, 9] предложена математическая модель для процессов деструкции полибутадиена в растворе толуола, формализующая процесс деструкции полимера как цепь Маркова (рис. 1). Динамика ММР полимера описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова–Чепмена:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{P}, \quad \mathbf{P}\big|_{t=0} = \mathbf{P}_0;$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} -\sum_{j=2}^{N}\lambda_{1,j} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{1,2} & -\sum_{j=3}^{N}\lambda_{2,j} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ \lambda_{1,i} & \lambda_{2,i} & \dots & -\sum_{j=i+1}^{N}\lambda_{i,j} & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \\ \lambda_{1,N} & \lambda_{2,N} & \dots & 0 & \lambda_{N-1,N} & 0 \end{bmatrix}; \ \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_i \\ \dots \\ P_N \end{bmatrix}; \ \mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} P_{10} \\ P_{20} \\ \dots \\ P_{i0} \\ \dots \\ P_{N0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

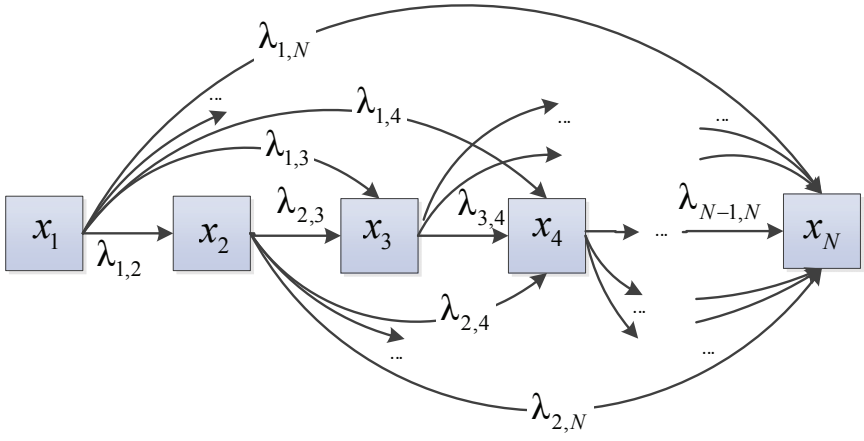


Рис. 1. Граф состояний системы

где $\mathbf{\Lambda}$ – матрица переходов; $\lambda_{i,j}$ – интенсивности переходов из i-го в j-е состояние; $\mathbf{P}$ – вектор вероятности нахождения системы в заданном состоянии; P_i – вероятность, определяющая нахождение макромолекулы в i-м состоянии (молекулярной фракции), $i = \overline{1, N}$, N – число состояний (молекулярных фракций), $\mathbf{P}_0$ – вектор вероятностей при $t = 0$.

Оценку динамики математического ожидания молекулярной массы $M[t]$, отражающую динамику средневзвешенной молекулярной массы, проводили по выражению

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i}^{N} P_i(t) m_i \,, \tag{2}$$

где m_i – средняя масса макромолекул, относящихся к i-й фракции.

При учете влияния температуры или концентрации агента деструкции на λ уравнение (1) становится нелинейным, и для его решения целесообразно использовать численные методы интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение (1) осуществлено численно в среде MathWorks Simulink™. Для преобразования системы (1) в структурную схему Simulink™ использовалась методика, представленная в [10]. Идентификация параметров математической модели проводилась по экспериментальным данным процесса деструкции полибутадиена в растворе на базе Воронежского филиала ФГУП «НИИСК» [6, 7].

Интеграция математической модели в систему управления технологическим процессом

Для использования цепи Маркова в задаче управления процессом деструкции необходимо непрерывно оценивать ММР полимера. В условиях производства это не всегда возможно реализовать. Для непрерывного контроля за ходом процесса деструкции можно использовать инварианты ММР, отражающие его интегральную характеристику. В таком случае целесообразно использовать модель процесса на основе скрытой марковской цепи (**СМЦ**), где реальная структура системы воспроизводится по некоторым наблюдаемым величинам, которые поддаются непосредственному или косвенному измерению с приемлемой погрешностью [11, 12]. Тогда скрытая часть описывается с помощью марковской цепи (1), а в качестве наблюдаемых переменных выступают непрерывно измеряемые интегральные оценки функции ММР Q_k. Для описания связи наблюдаемых переменных с переменными состояния $\mathbf{P}$ используются функциональные отношения $Q_k = q_k(P_1, P_2, ..., P_N)$. Например, косвенную оценку такой интегральной характеристики ММР, как средневзвешенной молекулярной массы M_W, можно получить по измерениям мощности, затрачиваемой на перемешивание полимеризата, степени затухания ультразвукового сигнала или по перепаду давления, создаваемого при течении раствора полимера [13, 14].

Тогда СМЦ задается множеством $\mathbf{Ch} = \{\mathbf{S}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{q}, \mathbf{P}_0\}$, где $\mathbf{S}$ – вектор состояний; $\mathbf{P}$ – вектор вероятности нахождения системы в состоянии $\mathbf{S}$, $(P(S_n) = P_n)$; $\mathbf{Q}$ – вектор наблюдений размерностью M; $\mathbf{\Lambda} = \lambda_{ij}$ – матрица интенсивностей переходов из состояния i в состояние j для $\forall t \in [0, T_M]$, где T_M – время моделирования; $\mathbf{q} = q_{n,m}$ – матрица-функция отображения $\mathbf{P} \to \mathbf{Q}$; $\mathbf{P}_0$ – вектор вероятности нахождения системы в состоянии $\mathbf{S}$ в момент времени $t = 0$. Соответствующий граф состояний представлен на рис. 2.

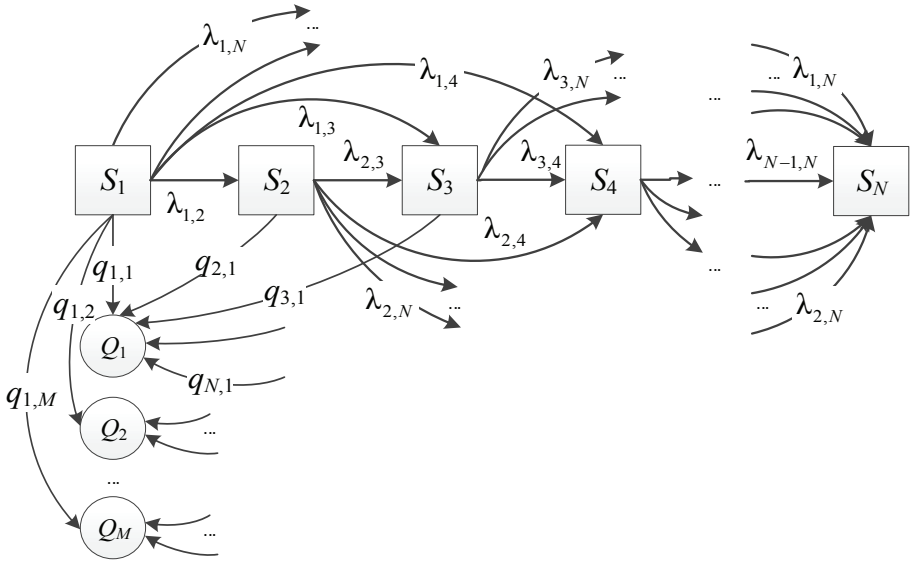


Рис. 2. Граф состояний системы для скрытой цепи Маркова

Функциональная связь наблюдаемых переменных с переменными состояния, формирующимися цепью Маркова, позволяет реализовать оценку скрытой части цепи по измерениям наблюдаемой переменной при условии идентификации параметров скрытой части по эксперименту. В этом случае математическая модель будет представлять собой систему уравнений Колмогорова–Чепмена с добавлением уравнений связи скрытых переменных с наблюдаемыми (средневзвешенной M_W и среднечисленной M_N молекулярной массой полимера, коэффициентом полидисперсности K_P):

$$\begin{cases} \dfrac{d\,\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{P}(t), \\ M_W(t) = \dfrac{\sum\limits_i^N m_i P_i(t)}{\sum\limits_i^N P_i(t)}, \quad M_N(t) = \dfrac{1}{\sum\limits_i^N \left(\dfrac{P_i(t)}{\sum\limits_i^N P_i(t)} \right)}, \quad K_P(t) = \dfrac{M_W(t)}{M_N(t)}; \\ \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0. \end{cases} \tag{3}$$

Рассмотрим пример оценки скрытой части СМЦ по одной наблюдаемой переменной M_W. Структура процедуры оценки параметров скрытой части СМЦ представлена на рис. 3.

Исходные данные (начальное ММР полимера) подаются на вход модели СМЦ. В блоке оценки параметров осуществляется итерационный процесс оценки $\mathbf{\Lambda}$, минимизирующий среднеквадратичное отклонение расчетных данных от экспериментальных наблюдаемых переменных M_W

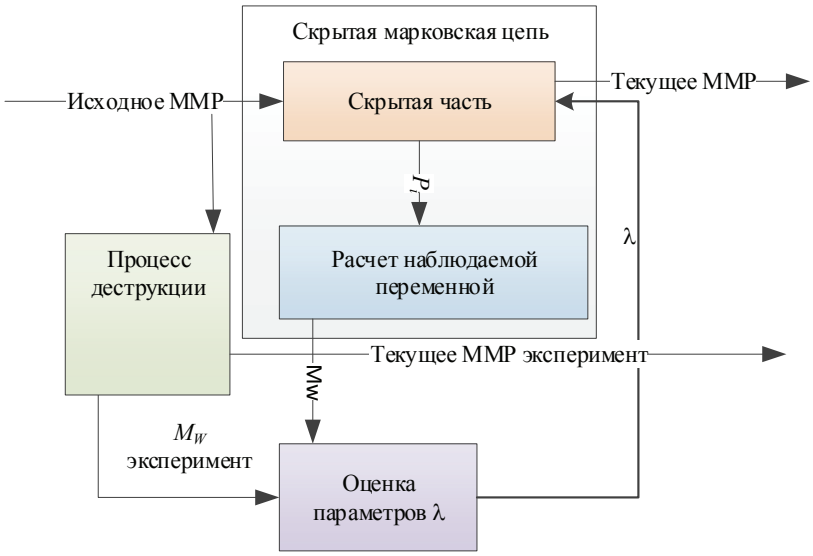


Рис. 3. Структура процедуры оценки параметров скрытой части СМЦ

$$S = \sum_{i=1}^{N} \left[M_W(t_i)^{\text{эксп}} - M_W(t_i)^{\text{расч}} \right]^2 \xrightarrow[\lambda]{} \min, \tag{4}$$

где N – количество контрольных точек при заданном времени деструкции, ограничения на значения параметров $\lambda_{ij} \geq 0$.

Оценка параметров СМЦ проведена по экспериментальным значениям M_W, M_N и K_P (табл. 1), уравнениям связи скрытых переменных с наблюдаемыми (3).

В результате параметрической идентификации получена матрица интенсивностей переходов скрытой части марковской цепи

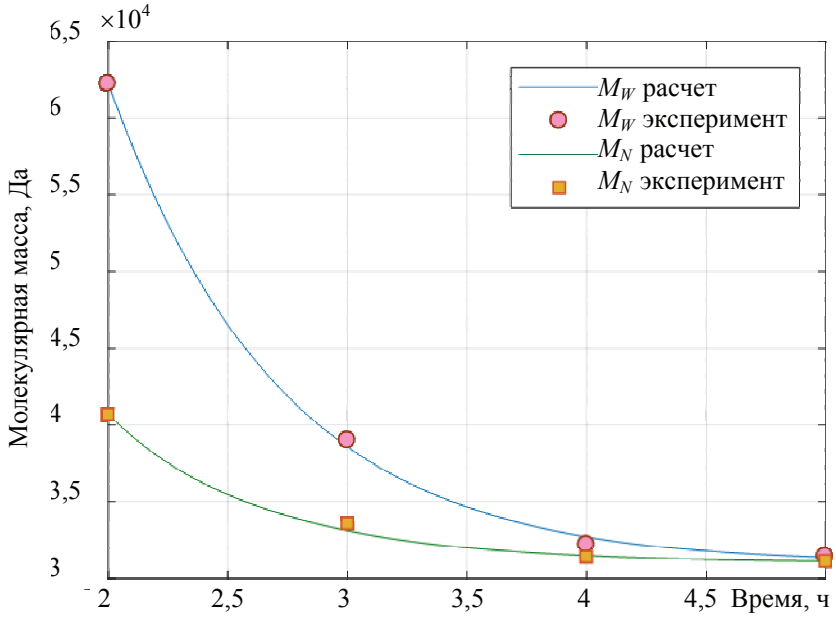
$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} 0 & 0.83897 & 0.56438 & 0.27719 & 0.21639 & 0.40077 \\ 0 & 0 & 0.8497 & 0.63415 & 0.27954 & 0.39883 \\ 0 & 0 & 0 & 0.99542 & 1.0415 & 0.23174 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.0863 & 0.068497 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.6529 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Таблица 1

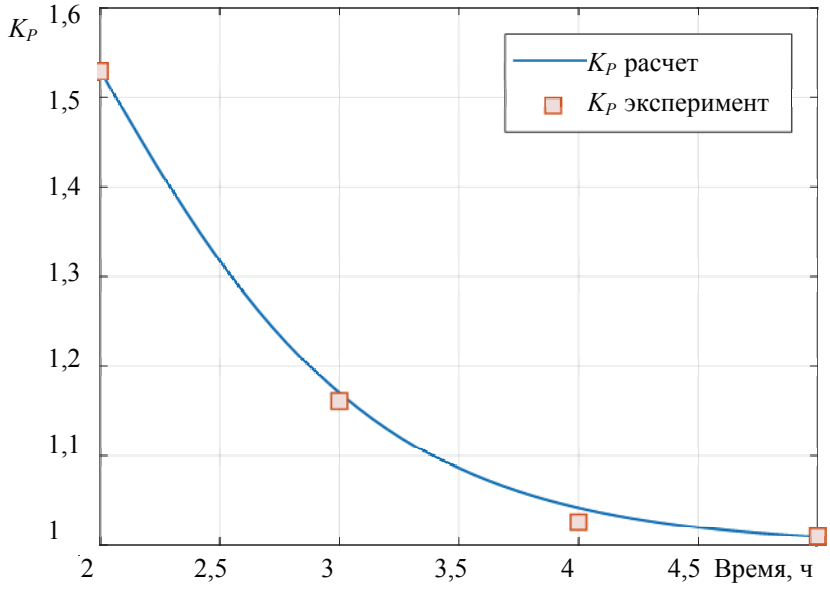
Динамика изменения наблюдаемых переменных

Наблюдаемые переменные	Время процесса деструкции, ч			
	2	3	4	5
Средневзвешенная молекулярная масса M_W	$6{,}225 \cdot 10^4$	$3{,}9 \cdot 10^4$	$3{,}224 \cdot 10^4$	$3{,}145 \cdot 10^4$
Среднечисленная молекулярная масса M_N	$4{,}07 \cdot 10^4$	$3{,}36 \cdot 10^4$	$3{,}142 \cdot 10^4$	$3{,}115 \cdot 10^4$
Коэффициент полидисперсности K_P	1,529	1,161	1,025	1,01

Относительная погрешность расчета наблюдаемых переменных (M_W, M_N, K_P) составила в среднем 3,5 %, максимальная не превысила 25 % (рис. 4, 5). Относительная погрешность расчета ММР в среднем составила 12 %, максимальная в единичных случаях для отдельных фракций превысила 50 % (см. рис. 5), что выше погрешности расчета функции ММР по марковской цепи. Однако характер изменения функции ММР при этом отражается качественно верно (см. рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Динамика изменения наблюдаемых переменных СЦМ (M_W, M_N и K_P)

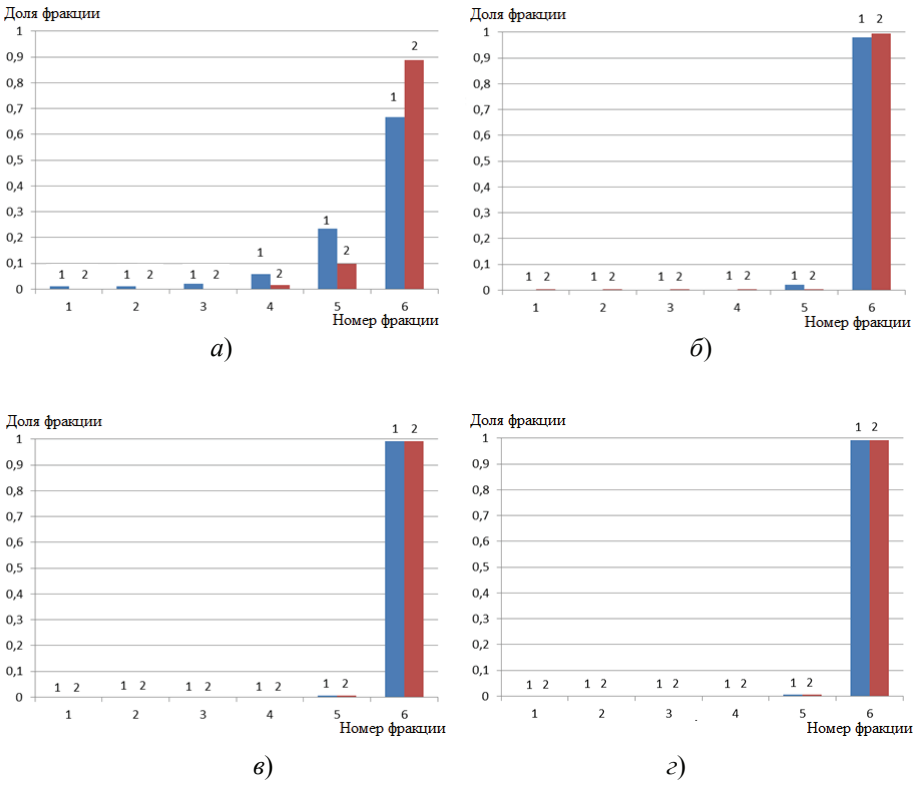


Рис. 5. ММР полимера в ходе деструкции в течение времени, ч:
а – 2; *б* – 3; *в* – 4; *г* – 5; *1* – эксперимент; *2* – расчет

Рис. 6. Функциональная схема процесса деструкции

Таким образом, зная начальное состояние системы в виде ММР полимера, проведя оценку параметров скрытой марковской цепи по данным наблюдаемых переменных, значения которых измеряются непрерывно во времени, можно оценивать динамику ММР в ходе процесса деструкции. Техническая реализация в условиях промышленного производства происходит следующим образом (рис. 6). Перед загрузкой в реактор сырье подвергается контролю качества с использованием метода гель-проникающей хроматографии (**ГПХ**). После этого в реакторе стабилизируется температура и подается агент деструкции. Далее в ходе процесса деструкции осуществляется непрерывное измерение крутящего момента на валу перемешивающего устройства и измерение вязкости раствора для оценки M_W (можно также реализовать другой способ косвенного контроля в соответствии с [13, 14]). В случае отклонения целевого значения M_W, соответствующего заданному ММР полимера, осуществляется коррекция расхода агента деструкции или температуры в реакторе до минимизации отклонения, рассчитанного по скрытой цепи Маркова значения M_W от требуемого.

Заключение

Разработанный подход позволяет осуществлять непрерывную оценку ММР только на основе измеряемых в ходе процесса деструкции наблюдаемых переменных. С точки зрения практического применения такой подход позволяет использовать лабораторную оценку ММР полимера путем ГПХ лишь на начальной стадии для исходного сырья, а затем использовать доступные для измерения в режиме реального времени косвенные оценки качества (например, косвенно измерять средневзвешенную молекулярную массу M_W по динамической вязкости раствора полимера). Стоит отметить, что интегральная характеристика не является исчерпывающей характеристикой функции ММР и для каждого типа полимера и технологической схемы требуется идентификация параметров скрытой части цепи Маркова по данным ГПХ.

Список литературы

1. Синтез низкомолекулярных каучуков с функциональными группами методом термоокислительной деструкции / Ю. К. Гусев, В. Н. Папков, Т. Н. Шехавцова [и др.] // Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 23 – 27 мая 2011 г. – М., 2012. – С. 45–46.

2. Попов, А. П. Системный анализ, моделирование и управление периодическим процессом термоокислительной деструкции полимеров в растворе : дис. … канд. техн. наук / А. П. Попов. – Воронеж, 2015. – 243 с.

3. Системный анализ процесса термоокислительной деструкции полимеров в растворе как объекта управления / В. К. Битюков, И. А. Хаустов, А. А. Хвостов, А. П. Попов // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2014. – № 3(61). – С. 61 – 66. doi: 10.20914/2310-1202-2014-3-61-66

4. Подвальный, С. Л. Структурно-молекулярное моделирование непрерывных технологических процессов многоцентровой полимеризации : монография/ С. Л. Подвальный, А. В. Барабанов. – Воронеж : Научная книга, 2011. – 104 с.

5. Улитин, Н. В. Методы моделирования кинетики процессов синтеза и молекулярно-массовых характеристик полимеров : монография / Н. В. Улитин, К. А. Терещенко. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. – 228 с.

6. Gagniuc, P. A. Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation / P. A. Gagniuc. – Wiley, 2017. – 256 p.

7. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение : монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов ; отв. ред. Н. М. Жаворонков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2023. – 440 с.

8. Матрично-графовая модель процесса деструкции полимерных материалов / А. А. Хвостов, С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов, А. А. Журавлев, А. В. Карманов // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2018. – Т. 80, № 3(77). – С. 50 – 55. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-50-55

9. Математическая модель изменения фракционного состава полибутадиена в ходе его деструкции в растворе на основе цепи Маркова / А. А. Хвостов, А. В. Иванов, С. Г. Тихомиров, В. И. Ряжских, И. А. Хаустов, В. К. Битюков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 67 – 78. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.067-078

10. Herman, R. Solving Differential Equations Using Simulink / R. Herman. – 2017. – 92 p. – URL : https://ya.ru/search/?text=Herman%2C+R.+Solving+Differential+Equations+Using+Simulink+%2F+R.+Herman.+%E2%80%93+2017.+%E2%80%93+92+%D1%80.+&lr=13 (дата обращения: 25.03.2025).

11. Ghahramani, Z. An Introduction to Hidden Markov Models and Bayesian Networks / Z. Ghahramani // Internatioanal Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 2001. – Vol. 15, No. 1. – P. 9 – 42. doi:1 0.1142/S0218001401000836

12. Elliott, R. J. Hidden Markov Models: Estimation and Control / R. J. Elliott, L. Aggoun, J. B. Moore. – Springer Science & Business Media, 2008. – 382 p. – URL : https://users.cecs.anu.edu.au/~john/papers/BOOK/B05.PDF (дата обращения: 25.03.2025).

13. Пат. 2131887 Российская Федерация, МПК C08F 2/04 (1995.01), G05D 27/00 (1995.01). Способ контроля молекулярных параметров в процессах растворной полимеризации диенов / Битюков В. К., Тихомиров С. Г., Хвостов А. А.; заявитель и патентообладатель Воронежская государственная технологическая академия. – № 97120768/04; заявл. 15.12.1997; опубл. 20.06.1999.

14. Пат. 2418298 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01), G01N 29/11 (2006.01). Способ ультразвукового контроля средневесовой молекулярной массы полимеров в растворе / Битюков В. К., Хвостов А. А., Енютин А. Ю.; патентообладатель ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия». – № 2010105442/28; заявл. 15.02.2010; опубл. 10.05.2011. – Бюл. № 13. – 7 с.

Monitoring of Polymer Molecular Weight Distribution during Thermal-Oxidative Degradation Based on Hidden Markov Chain

A. A. Khvostov[1,2], I. A. Khaustov[2], S. G. Tikhomirov[2], E. A. Bityukova[2]✉

Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (1); Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies (2), eabityukova@yandex.ru, Voronezh, Russia

Keywords: gel permeation chromatography; polymer degradation in solution; molecular weight distribution; hidden Markov chains; thermal-oxidative degradation.

Abstract: The article considers a variant of technical implementation of the system of monitoring and control of the process of thermal-oxidative degradation. Control is carried out using a mathematical model of the process. The mathematical

model is obtained in the form of a system of Kolmogorov-Chapman equations with the addition of equations for the connection of hidden variables with observables. As observable variables, the invariants of the molecular-mass distribution of the polymer (MWD) are used - the weighted average, the number of average molecular masses of the polymer and the polydispersity coefficient. The primary data of the monitoring and control system is the initial state of the system in the form of the MWD of the polymer, obtained by a laboratory method. The parameters of the hidden Markov chain are estimated based on the data of the observable variables, the values of which are measured continuously in time. Continuous monitoring of the weighted average molecular mass of the polymer is carried out by any of the known methods (for example, by the dynamic viscosity of the solution). Based on the data obtained, the MWD is calculated during the degradation process.

References

1. Gusev Yu.K., Papkov V.N., Shekhavtsova T.N. [et al.], *Rezinovaya promyshlennost': syr'ye, materialy, tekhnologii : materialy XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Rubber industry: raw materials, materials, technologies: materials XVII Int. scientific-practical. conf.], Moskva, 23-27 May 2011, Moscow, 2012, pp. 45-46. (In Russ.)
2. Popov A.P. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Voronezh, 2015, 243 p. (In Russ.)
3. Bityukov V.K., Khaustov I.A., Khvostov A.A., Popov A.P. [System analysis of the process of thermo-oxidative destruction of polymers in solution as a control object], *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2014, no. 3(61), pp. 61-66. doi: 10.20914/2310-1202-2014-3-61-66 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Podval'nyy S.L., Barabanov A.V. *Strukturno-molekulyarnoye modelirovaniye nepreryvnykh tekhnologicheskikh protsessov mnogotsentrovoy polimerizatsii: monografiya* [Structural and molecular modeling of continuous technological processes of multi-center polymerization: monograph], Voronezh: Nauchnaya kniga, 2011, 104 p. (In Russ.)
5. Ulitin N.V., Tereshchenko K.A. *Metody modelirovaniya kinetiki protsessov sinteza i molekulyarno-massovykh kharakteristik polimerov: monografiya* [Methods for modeling the kinetics of synthesis processes and molecular-weight characteristics of polymers: monograph], Kazan': Izdatel'stvo KNITU, 2014, 228 p. (In Russ.)
6. Gagniuc P.A. *Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation*, Wiley, 2017, 256 p.
7. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu.; Zhavoronkov N.M. (Ed.). *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii: izmel'cheniye i smesheniye: monografiya* [Systems analysis of chemical engineering processes: grinding and mixing: monograph], Moscow: Yurayt, 2023, 440 p. (In Russ.)
8. Khvostov A.A., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Zhuravlev A.A., Karmanov A.V. [Matrix-graph model of the process of destruction of polymeric materials], *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2018, vol. 80, no. 3(77), pp. 50-55. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-50-55 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Khvostov A.A., Ivanov A.V., Tikhomirov S.G., Ryazhskikh V.I., Khaustov I.A., Bityukov V.K. [Mathematical model of changes in the fractional composition of polybutadiene during its destruction in solution based on the Markov chain], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 67-78. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.067-078 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Herman R. *Solving Differential Equations Using Simulink*, 2017, 92 p. available at: https://ya.ru/search/?text=Herman%2C+R.+Solving+Differential+Equations+Using+Simulink+%2F+R.+Herman.+%E2%80%93+2017.+%E2%80%93+92+%D1%80.+&lr=13 (accessed 25 March 2025).

11. Ghahramani Z. An Introduction to Hidden Markov Models and Bayesian Networks, *Internatioanal Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2001, vol. 15, no. 1, pp. 9-42. doi:1 0.1142/S0218001401000836

12. Elliott R.J., Aggoun L., Moore J.B. *Hidden Markov Models: Estimation and Control*, Springer Science & Business Media, 2008, 382 p. available at: https://users.cecs.anu.edu.au/~john/papers/BOOK/B05.PDF (accessed 25 March 2025).

13. Bityukov V.K., Tikhomirov S.G., Khvostov A.A. *Sposob kontrolya molekulyarnykh parametrov v protsessakh rastvornoy polimerizatsii diyenov* [Method for monitoring molecular parameters in solution polymerization of dienes], Russian Federation, 1999, Pat. 2131887 (In Russ.)

14. Bityukov V.K., Khvostov A.A., Yenyutin A.Yu. *Sposob ul'trazvukovogo kontrolya srednevesovoy molekulyarnoy massy polimerov v rastvore* [Method for ultrasonic monitoring of the average molecular weight of polymers in solution], Russian Federation, 2011, Pat. 2418298 (In Russ.)

Überwachung der Molekulargewichtsverteilung des Polymers im Prozess des thermo-oxidativen Abbaus auf der Grundlage der versteckten Markov-Kette

Zusammenfassung: Es ist ein Ansatz für die Synthese des Systems zur Überwachung und Steuerung des thermo-oxidativen Abbauprozesses vorgeschlagen. Die Kontrolle wird auf der Grundlage des mathematischen Modells des Prozesses durchgeführt. Es ist ein mathematisches Modell in Form der Markov-Kette und Gleichungen zur Verbindung von verborgenen Variablen mit beobachtbaren Variablen verwendet. Als beobachtbare Variablen werden die Invarianten der Polymermolekularmassenverteilung (MMD) – gewichteter Durchschnitt, durchschnittliche Molekularmassen des Polymers und Polydispersitätskoeffizient – verwendet. Die Ausgangsdaten für das Überwachungs- und Kontrollsystem sind der Anfangszustand des Systems in Form der MMR des Polymers, der durch eine Labormethode ermittelt ist. Die Schätzung der Parameter der verborgenen Markov-Kette erfolgt auf der Grundlage der beobachteten Variablen, deren Werte kontinuierlich in der Zeit gemessen werden. Die kontinuierliche Kontrolle des gewichteten durchschnittlichen Molekulargewichts des Polymers erfolgt durch eine der bekannten Methoden (z. B. durch die dynamische Viskosität der Lösung). Die MMR während des Abbauprozesses ist aus den erhaltenen Daten berechnet.

Surveillance de la distribution de masse moléculaire par limer dans le processus de destruction par oxydation thermique à base de chaîne de markov latente

Résumé: Est proposée une approche de la synthèse du système de contrôle et de commande du processus de la destruction de l'oxydation thermique. La gestion est basée sur un modèle mathématique de processus. Est utilisée la méthode mathématique sous la forme d'une chaîne de Markov et des équations de la relation entre les variables cachées et les observables. Les variables observées sont les invariants de la distribution de masse molaire du polymère (MMP) – poids moléculaire moyen pondéré, poids

moléculaire moyen du polymère et coefficient de polydispersité. Les données de base pour le système de contrôle et de contrôle sont l'état initial du système sous forme de polymère MMP, obtenu en laboratoire. Les paramètres de la chaîne de Markov latente sont évalués à partir des variables observées, dont les valeurs sont mesurées dans le temps. Le contrôle continu du poids moléculaire moyen pondéré du polymère est effectué par l'une des méthodes connues (par exemple, la viscosité dinamique de la solution). Selon les données obtenues, les MMP sont calculées pendant le processus de destruction.

Авторы: ***Хвостов Анатолий Анатольевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия; ***Хаустов Игорь Анатольевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; ***Тихомиров Сергей Германович*** – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; ***Битюкова Елизавета Алексеевна*** – аспирант, ассистент кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия.

УДК 681.5
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.235-244

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

А. В. Кайченов, М. О. Емашев✉, А. А. Яроцкая

Кафедра автоматики и вычислительной техники, emashevmo@mauniver.ru; ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия

Ключевые слова: двигатель постоянного тока; имитационное моделирование; лабораторный стенд; образование; цифровой двойник.

Аннотация: В настоящее время приоритетным направлением развития университетов является цифровая трансформация образовательного процесса. Возникает потребность в создании виртуальных пространств и виртуальных лабораторий для обучения студентов. Рассмотрено проектное решение по созданию цифрового двойника лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока». Выявлены причины, по которым целесообразно разрабатывать цифровые двойники лабораторных стендов в вузах. Выбрана среда разработки. Проведены эксперименты моделирования частоты вращения двигателя постоянного тока и моделирование частоты вращения двигателя с постоянными магнитами с подключением к лабораторному стенду в реальном времени.

Введение

Учебные стенды – важная часть материально-технического обеспечения университета, так как с их помощью обучающиеся приобретают новые навыки и компетенции. Из-за сложного устройства учебные стенды требуют специального обслуживания. Поэтому в настоящее время все больше предприятий и образовательных учреждений направляют вектор развития в цифровую трансформацию образовательного процесса.

Разработка цифровых двойников является новым направлением развития рынка виртуальных технологий в образовании. Из-за недостатка на рынке цифровых аналогов учебного оборудования требуется проведение работ по разработке виртуальных лабораторий и учебных стендов.

Причины, по которым целесообразно разрабатывать цифровые двойники лабораторных стендов в вузах [1]:

– увеличение доступности обучения: цифровые двойники позволяют студентам иметь доступ к наиболее востребованным лабораторным стендам в любое время и из любой точки мира;

– экономическая эффективность: цифровые двойники могут сэкономить деньги на оборудовании, обучении и перевозке, их обслуживании и поддержке;

– возможность углубления и расширения знаний: виртуальность позволяет студентам углубить свои знания в конкретной области, а также освоить материал из других дисциплин;

– безопасность: использование цифровых двойников позволяет избежать опасности для студентов, связанной с взаимодействием с реальным оборудованием;

– универсальность: цифровые двойники могут быть адаптированы для разных дисциплин и настроены на нужды конкретной группы студентов;

Некоторые клиники используют медицинские цифровые двойники для обучения сотрудников. В исследовании [2] студентами инженерных направлений отмечены положительные стороны использования цифровых двойников в обучении.

Концепция цифровых двойников находится в третьем поколении, где искусственный интеллект и алгоритмы глубокого обучения используют онлайн-данные. Цифровые двойники первого поколения представляли собой виртуальные презентации, основанные на языках сценариев, а цифровые двойники второго поколения, представленные в 2012 году, были в большей степени ориентированы на моделирование [3]. В дополнение к представлению отдельных систем, цифровые двойники способны объединять отдельные цифровые двойники для представления полных заводов, цепочек поставок, аэропортов и умных городов [4]. Международная организация по стандартизации (ISO) определила стандарты для системы цифровых двойников в 2021 году [5], и стандартизация является показателем цифрового двойника как зрелой концепции.

Современные инженерные курсы основываются на практической проектной деятельности, в высшей степени ориентированной на разработку и тестирование реального продукта «цифрового двойника» [6]. В работе [7] введено понятие «системно-ориентированная разработка продукта» (*англ.* Systems-Drive Product Development – SDPD) – это современная методология, основанная на моделировании, которая позволяет объединить различные этапы разработки сложных систем и повторно использовать созданные модели для проектирования новых продуктов в будущем. При таком подходе весь процесс разработки системы поддерживается в рамках единого проекта, где все созданные модели взаимосвязаны и, следовательно, влияют друг на друга [8].

Результаты исследований [9] показали, что каждая область инфраструктуры и организаций подходит к разработке цифровых двойников с разной точки зрения: цифровой двойник как концепция и следующий шаг цифровой трансформации; с другой точки зрения, цифровой двойник – как реалистичное представление актива в реальном времени.

В исследовании [10] виртуальные лаборатории зарекомендовали себя как эффективный инструмент инженерного образования для дистанционного обучения, открывающий новые возможности и для совершенствования процесса очного обучения.

Объекты и методы

Цифровой двойник изделия (**ЦДИ**) лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования (**АСР**) двигателя постоянного тока» (*далее* – лабораторный стенд) предназначен для обучения теории автоматического управления.

Устройство позволяет:

– приобрести компетенции для достижения результатов обучения;

– повысить квалификацию обучающихся;

– проводить дистанционные эксперименты вне учебной аудитории, используя полноценную замену реального физического стенда, аналогичного по качеству очному обучению;

– упростить восприятие экспериментальных исследований, благодаря пользовательскому интерфейсу интуитивно понятному обучающимся;

– сохранять и обрабатывать данные в файл электронной таблицы;

– упростить запоминание изучаемого материала через взаимодействие с адекватной имитационной моделью.

На первом этапе исследовался объект моделирования – ЦДИ лабораторного стенда, с помощью которого проводилась серия лабораторных работ по дисциплине «Теория автоматического управления» (рис. 1) [11]. Объектом управления лабораторного стенда являются маломощные двигатели постоянного тока (**ДПТ**) QX-RS-385-2073 (рис. 2) [12]. При исследовании объекта управления применялись методы математического и компьютерного моделирования.

Для обработки данных использовались статистический анализ и визуализация данных для представления результатов испытаний и анализа. Проведен анализ среды разработки Unity 3D и выявлены следующие преимущества:

– множество обучающего материала;
– большой выбор функций;
– удобный интерфейс для создания пользовательских интерфейсов;
– широкий выбор платформ для разработки;
– надежность и стабильность [13].

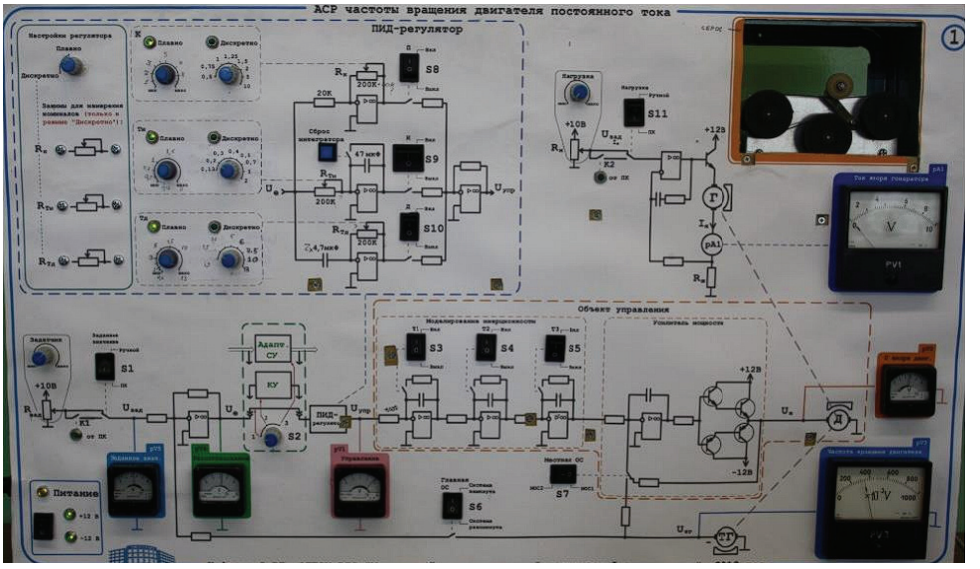


Рис. 1. Лабораторный стенд «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока»

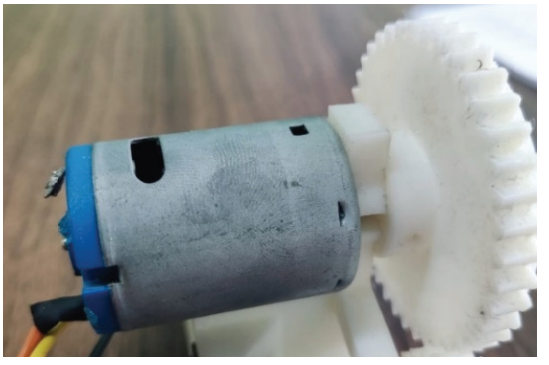


Рис. 2. Двигатель постоянного тока QX-RS-385-2073

Результаты и обсуждение

В результате исследования разработан ЦДИ лабораторного стенда. Проведены эксперименты, направленные на испытания изделия. Цифровой двойник позволяет моделировать процессы в лабораторном стенде и осуществлять двухстороннюю информационную связь в реальном времени. Полученные данные сохраняются в файл в формате CSV. Структура цифрового двойника представлена на рис. 3.

Эксперимент, проводимый по заданным методикам, включал в себя обработку и анализ результатов экспериментальных данных и составление описания выполненных исследований [14].

Моделирование переходного процесса проводилось для двигателя постоянного тока ПМ51 с заданными параметрами ПИД-регулятора и моделированием инерционности 2-го порядка при частоте вращения 900 об/мин. Параметры ДПТ ПМ51 при моделировании представлены на рис. 4. Взаимодействие пользователя с ЦДИ начинается с ввода параметров ДПТ в окне настроек, настроек ПИД-регулятора, указания вида моделируемой инерционности и наличия главной обратной связи (рис. 5).

Во время тестовой эксплуатации цифрового двойника получен график переходного процесса двигателя в реальном времени, который представлен на рис. 6.

Результатом проведенных испытаний является CSV-файл с данными переходного процесса (рис. 7). Эксперимент по выявлению возможных проблем регистрации данных в реальном времени с ЦДИ «АСР частоты вращения двигателя с постоянными магнитами» позволил получить переходный процесс, представленный на рис. 8.

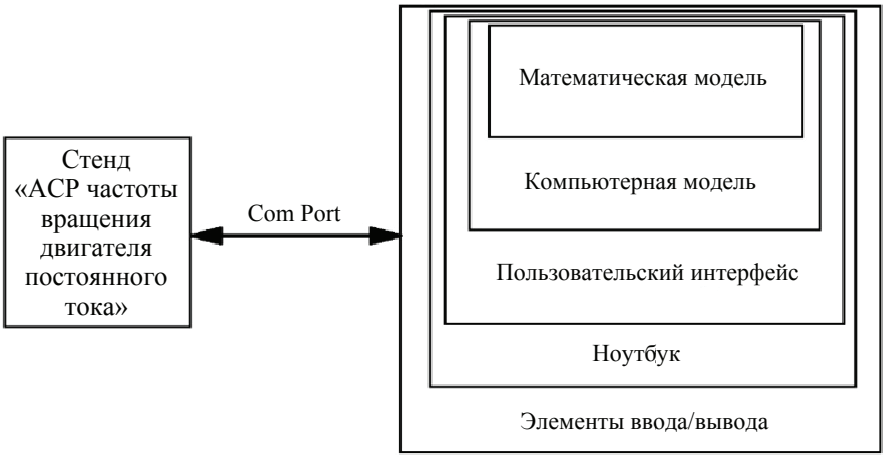


Рис. 3. Структура цифрового двойника

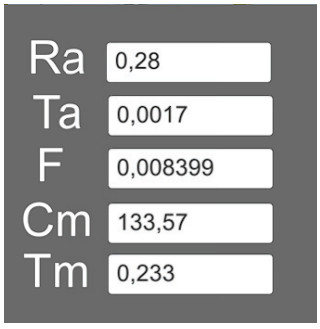


Рис. 4. Окно настроек значений ДПТ

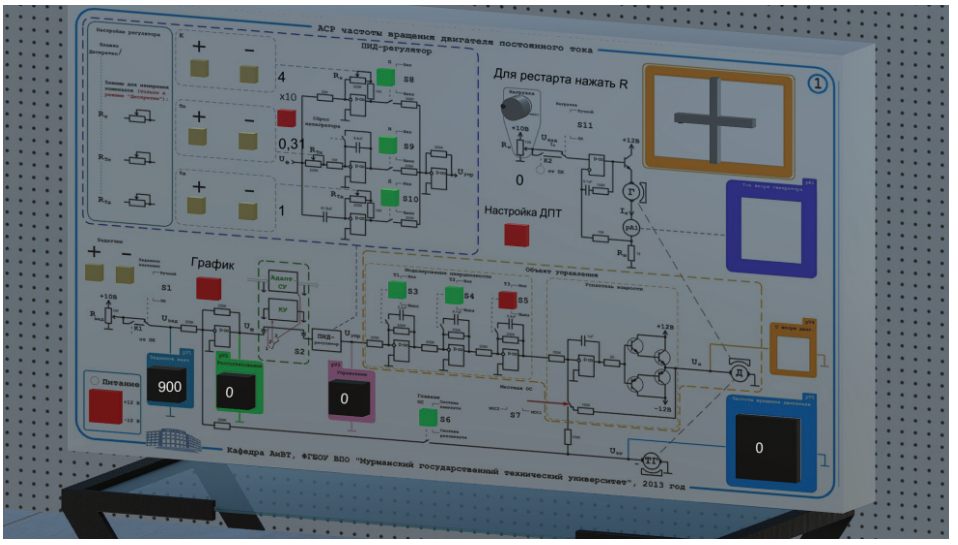


Рис. 5. Вид ЦДИ с настроенными параметрами при моделировании

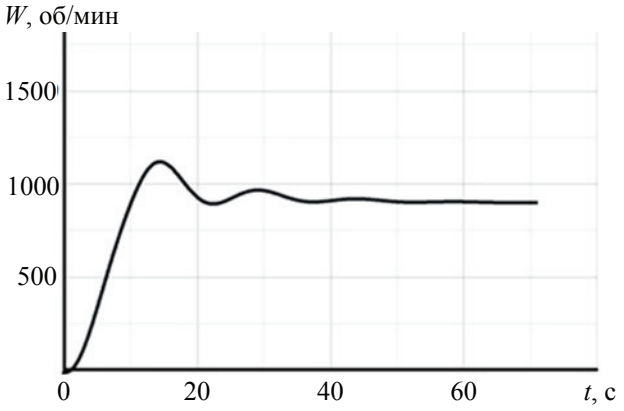


Рис. 6. График переходного процесса в реальном времени

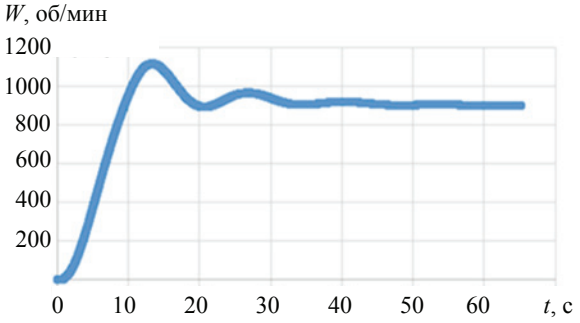


Рис. 7. Результаты эксперимента и переходная характеристика, построенная по данным эксперимента

Time	Uzad	Uupr	Utg	Unagr	Ue
0,038022	0	0	0	0	0
0,077475	1023	843	0	318	1023
0,127239	1023	821	0	323	1023
0,165739	1023	810	0	323	1023
0,211512	1023	794	0	324	1023
0,255692	1023	781	0	323	1023
0,308193	1023	774	0	324	1023
0,358588	1023	761	0	323	1023
0,400585	1023	753	0	325	1023
0,444898	1023	745	0	324	1023
0,484423	1023	753	0	328	1023
0,529722	1023	764	8	336	1015
0,570996	1023	724	8	326	1015
0,623193	1023	713	14	325	1009
0,676954	1023	713	14	325	1009
0,737057	1023	659	38	341	985
0,808859	1023	661	45	341	978
0,857693	1023	558	51	340	972
0,960755	1023	558	51	340	972
1,021848	1023	478	59	334	964
1,074448	1023	478	59	334	964
1,189875	1023	468	69	339	954
1,267916	1023	507	60	339	963
1,361399	1023	507	60	339	963
1,457767	1023	480	73	341	950
1,533261	1023	500	70	340	953
1,61299	1023	502	65	330	958
1,669287	1023	474	68	332	955
1,729307	1023	474	68	332	955

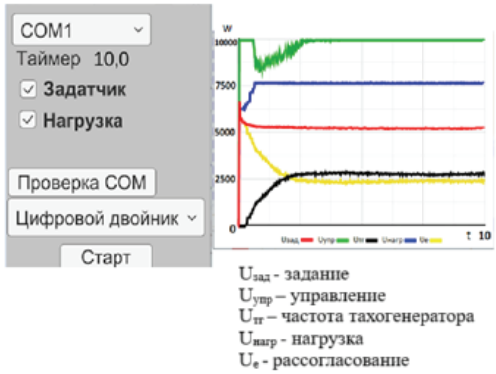


Рис. 8. Результаты эксперимента регистрации данных в реальном времени

Заключение

Разработан и исследован цифровой двойник лабораторного стенда «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока». Предложенное решение позволяет закрыть нехватку учебных цифровых двойников и проводить дистанционные занятия для заочной формы обучения. Получена математическая модель, описывающая управление частотой двигателя постоянного тока. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665912. Данное решение в перспективе можно использовать на смартфонах и планшетах пользователей.

Совершенствование математической модели позволит исследовать ДПТ другой мощности, других видов, что значительно расширит закрепленные на практике компетенции обучающихся. С помощью модернизации программного обеспечения цифрового двойника возможна реализация способов управления с применением корректирующих устройств и адаптивных систем управления, которые сложны в аппаратной реализации лабораторного стенда.

Исследование выполнено в рамках инициативной НИОКР № 124041100082-5.

Список литературы

1. Комиссаров, В. И. Использование цифровых двойников для обучения студентов в вузах Российской Федерации / В. И. Комиссаров, Г. Ф. Шулико, Д. С. Павлов // Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой : материалы V Междунар. студ. науч. конф., Москва, 15–16 июня 2023 г. – М., 2023. – С. 131 – 137.

2. Liljaniemi, A. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers / A. Liljaniemi, H. Paavilainen // Open Engineering. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 377 – 385. doi: 10.1515/eng-2020-0040

3. Common Educational Teleoperation Platform for Robotics Utilizing Digital Twins / T. Kaarlela [et al.] // Machines. – 2022. – Vol. 10, No. 7. – P. 577. doi: 10.3390/machines10070577

4. Alcaraz, C. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats / C. Alcaraz, J. Lopez // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 3. – P. 1475 – 1503. doi: 10.1109/COMST.2022.3171465

5. ISO 23247-1:2021. Automation Systems and Integration – Digital Twin Framework for Manufacturing. Part 1: Overview and General Principles. – International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2000. – URL : https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75066/29271dec129c4c1c9569f961bfa4963d/ISO-23247-1-2021.pdf (дата обращения: 17.03.2025).

6. Implementation of "Digital Twin" Concept for Modern Project-Based Engineering Education / S. Nikolaev [et al.] // In book: Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018 ; IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer International Publishing, 2018. – P. 193 – 203. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2_18

7. Challenges and Opportunities within Simulation-Driven Functional Product Development and Operation / J. Pavasson [et al.] // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 22, No. 1. – P. 169 – 174. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.149

8. Functional Product Development: what Information Should Be Shared During the Development Process? / J. Lindström, M. Löfstrand, M. Karlberg, L. Karlsson // International Journal of Product Development. – 2012. – Vol. 16, No. 2. – P. 95 – 111. doi: 10.1504/IJPD.2012.049059

9. Broo, D. G. Digital Twins in Infrastructure: Definitions, Current Practices, Challenges and Strategies / D. G. Broo, J. M. Schooling // International Journal of Construction Management. – 2021. – Vol. 23, No. 11. – P. 1254 – 1263. doi: 10.1080/15623599.2021.1966980

10. Rassudov, L. Virtual Labs: An Effective Engineering Education Tool for Remote Learning and not only / L. Rassudov, A. Korunets // 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED). – 2022. – P. 1 – 4. doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722375

11. Модернизация учебно-лабораторного стенда «АСР частоты вращения ДПТ» / А. В. Власов, А. Р. Власова, А. В. Кайченов, А. А. Маслов, В. А. Бауэр // Наука и образование – 2013 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 4 – 11 марта 2013 г. – Мурманск, 2013. – С. 36 – 41.

12. Лабораторный стенд «Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока». Программные и аппаратные средства / А. В. Кайченов, А. В. Власов, А. А. Маслов, А. Р. Власова, И. Ю. Селяков // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. : в 4-х томах. Том 2. Курск, 19 – 21 марта 2014 г. – Мурманск, 2014. – С. 154 – 157.

13. Топорков, С. Е. Обзор среды разработки компьютерных игр Unity 3D / С. Е. Топорков, Н. А. Мотько // Мировые научные исследования и разработки в эпоху цифровизации : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. Часть 1, Ростов-на-Дону, 25 ноября 2021 г. – Ростов н/Д, 2021. – С. 231–232.

14. Исследование динамических свойств АСР : метод. указания к выполнению лаб. работ по курсу «Теория автоматического управления» для специальности 210200 «Автоматизация технологических процессов и производств» / сост. А. А. Маслов, В. В. Яценко. – Мурманск : МГТУ, 2004. – 21 с.

Development and Research of the Digital Twin of the Laboratory Stand "Automatic System to Regulate the Rotation Frequency of a DC Motor"

A. V. Kaichnov, M. O. Emashev✉, A. A. Yarotskaya

Department of Automation and Computer Engineering, emashevmo@mauniver.ru; Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

Keywords: DC motor; simulation modeling; laboratory stand; education; digital twin.

Abstract: Currently, the priority direction of university development is the digital transformation of the educational process. There is a need to create virtual spaces and virtual laboratories for teaching students. The design solution for creating a digital twin of the laboratory stand "Automatic system for regulating the rotation frequency of a DC motor" is considered. The reasons for which it is advisable to develop digital twins of laboratory stands in universities have been identified. The development environment is selected. Experiments are conducted to simulate the rotation frequency of a DC motor and to simulate the rotation frequency of a motor with permanent magnets with connection to the laboratory stand in real time.

References

1. Komissarov V.I., Shuliko G.F., Pavlov D.S. *Innovatsionnyye mekhanizmy upravleniya tsifrovoy i regional'noy ekonomikoy: materialy V Mezhdunar. stud. nauch. konf.* [Innovative mechanisms for managing the digital and regional economy: Proc. V Int. Student Scientific Conf.], Moskva, 15-16 June 2023, Moscow, 2023, pp. 131-137. (In Russ.)

2. Liljaniemi A., Paavilainen H. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers, *Open Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 377-385. doi: 10.1515/eng-2020-0040

3. Kaarlela T. [et al.] Common Educational Teleoperation Platform for Robotics Utilizing Digital Twins, *Machines*, 2022, vol. 10, no. 7, pp. 577. doi: 10.3390/machines10070577

4. Alcaraz C., Lopez J. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 1475-1503. doi: 10.1109/COMST.2022.3171465

5. ISO 23247-1:2021. *Automation Systems and Integration – Digital Twin Framework for Manufacturing. Part 1: Overview and General Principles*, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2000, available at: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75066/29271dec129c4c1c9569f961bfa4963d/ISO-23247-1-2021.pdf (accessed 17 March 2025).

6. Nikolaev S. [et al.] Implementation of "Digital Twin" Concept for Modern Project-Based Engineering Education, In book: *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018 ; IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer International Publishing, 2018, pp. 193-203. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2_18

7. Pavasson J. [et al.] Challenges and Opportunities within Simulation-Driven Functional Product Development and Operation, *Procedia CIRP*, 2014, vol. 22, no. 1, pp. 169-174. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.149

8. Lindström J., Löfstrand M., Karlberg M., Karlsson L. Functional Product Development: what Information Should Be Shared During the Development Process? *International Journal of Product Development*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 95-111. doi: 10.1504/IJPD.2012.049059

9. Broo D.G., Schooling J.M. Digital Twins in Infrastructure: Definitions, Current Practices, Challenges and Strategies, *International Journal of Construction Management*, 2021, vol. 23, no. 11, pp. 1254-1263. doi: 10.1080/ 15623599.2021.1966980

10. Rassudov L., Korunets A. Virtual Labs: An Effective Engineering Education Tool for Remote Learning and not only, *29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED)*, 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722375

11. Vlasov A.V., Vlasova A.R., Kaychenov A.V., Maslov A.A., Bauer V.A. *Nauka i obrazovaniye – 2013: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Science and Education - 2013: Proc. Int. Scientific-Technical Conf.], Murmansk, 4-11 March 2013, Murmansk, 2013, pp. 36-41. (In Russ.)

12. Kaychenov A.V., Vlasov A.V., Maslov A.A., Vlasova A.R., Selyakov I.Yu. *Sovremennyye instrumental'nyye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii: sb. nauch. tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations: Collection of scientific papers of the XI Int. Scientific-Practical. Conf.], In 4 vols., vol. 2. Kursk, 19-21 March 2014, Murmansk, 2014, pp. 154-157. (In Russ.)

13. Toporkov S.Ye., Mot'ko N.A. *Mirovyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki v epokhu tsifrovizatsii: sb. st. XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [World scientific research and development in the digitalization era: Collection Art. XV Int. Scientific and Practical. Conf.], Part 1, Rostov-na-Donu, 25 November 2021, Rostov n/D, 2021, pp. 231-232. (In Russ.)

14. Maslov A.A., Yatsenko V.V. *Issledovaniye dinamicheskikh svoystv ASR: metod. ukazaniya k vypolneniyu lab. rabot po kursu «Teoriya avtomaticheskogo upravleniya» dlya spetsial'nosti 210200 «Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv»* [Study of the dynamic properties of ACS: method. instructions for completing lab work on the course "Automatic Control Theory" for specialty 210200 "Automation of Technological Processes and Production"], Murmansk : MGTU, 2004, 21p. (In Russ)

Entwicklung und Erforschung des digitalen Zwillingslaborstandes „Automatisches System der Drehzahlregelung des Gleichstrommotors“

Zusammenfassung: Derzeit liegt die vorrangige Richtung der Universitätsentwicklung auf der digitalen Transformation des Bildungsprozesses. Es besteht die Notwendigkeit, virtuelle Räume und virtuelle Labore für die Ausbildung der Studierenden zu schaffen. Es ist eine Designlösung zur Erstellung eines digitalen Zwillings des Laborstandes „Automatisches System zur Regelung der Drehfrequenz des Gleichstrommotors“ betrachtet. Die Gründe, warum es ratsam ist, digitale Zwillinge von Laborständen an Universitäten zu entwickeln, sind identifiziert. Die Entwicklungsumgebung ist ausgewählt. Es sind Experimente durchgeführt, um die Drehfrequenz des Gleichstrommotors und die Drehfrequenz des an einen Laborständer angeschlossenen Permanentmagnetmotors in Echtzeit zu simulieren.

Développement et recherche d'un double numérique d'un stand de laboratoire «Système de régulation automatique du régime moteur à courant continu»

Résumé: Actuellement, la priorité du développement des universités est la transformation numérique du processus éducatif. Il est nécessaire de créer des espaces virtuels et des laboratoires virtuels pour éduquer les étudiants. Est examinée la solution de conception pour la construction du double numérique du stand de laboratoire «Système de régulation automatique de la vitesse du moteur à courant continu». Sont identifiées les raisons pour lesquelles il est conseillé de développer des doubles numériques des stands de laboratoire dans les universités. Est sélectionné l'environnement de développement. Sont réalisées des expériences de simulation de la vitesse du moteur à courant continu et de simulation de la vitesse du moteur à aimant permanent avec connexion au banc de laboratoire en temps réel.

Авторы: ***Кайченов Александр Вячеславович*** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники; ***Емашев Максим Олегович*** – инженер-программист кафедры автоматики и вычислительной техники; ***Яроцкая Александра Андреевна*** – ассистент кафедры автоматики и вычислительной техники, ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия.

УДК 004.4.068
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.245-258

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С. А. Рачкова, В. Г. Мокрозуб✉

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

Ключевые слова: доступность школьного образования; многокритериальная задача; организационно-техническая система; парето-оптимальное решение.

Аннотация: Система школьного образования представлена как распределенная в пространстве организационно-техническая система с фрактальной структурой. Поставлена многокритериальная задача поиска региона, муниципалитета или школы с наименьшей доступностью качественного школьного образования, решаемая на федеральном, муниципальном или местном уровне. Предложены алгоритм решения задачи и пример расчета для Мучкапского муниципального округа Тамбовской области.

Введение

В соответствии с государственной программой развития образования «повышение доступности, эффективности и качества образования в соответствии с реалиями настоящего и вызовами будущего – одно из базовых направлений реализации государственной политики» [1]. Задача школьного образования заключается в подготовке молодого поколения, способного решать задачи будущего развития страны.

Оценить качество этой подготовки очень сложно, так как необходимо «рассматривать процесс функционирования школы во взаимосвязи внутренних и внешних условий, влияющих на продуктивность образовательной деятельности в целом, включая обеспечение социального благополучия, равенства, справедливости» и др. [2].

Тем не менее существуют международные программы и исследования по оценке образовательных результатов, такие как [3]:

«– PISA – Международная программа по оценке учебных достижений (*англ*. Programme for International Student Assessment);

– TIMSS – Международное мониторинговое исследование качества математического и естественнонаучного образования (*англ*. Trends in Mathematics and Science Study);

– PIRLS – Международное исследование качества чтения и понимания текста (*англ*. Progress in International Reading Literacy Study)» и др.

Опираясь на результаты данных и других исследований, многие авторы определяют условия и дают рекомендации по повышению качества школьного образования [4, 5], в том числе в сельской местности [6].

Естественно, что образовательные результаты учеников напрямую зависят от управления школьным образованием, представляющим собой сложную организационно-техническую систему, «комплексная деятельность» (**КД**) которой заключается в получении учащимися необходимых образовательных результатов [7].

Описание организационно-технической системы школьного образования

В Российской Федерации управление школьным образованием осуществляется четырехуровневой иерархической системой, в основе которой лежит разделение функций управления по территориальному принципу (рис. 1).

Основным «структурным элементом деятельности» (**СЭД**) [7] системы школьного образования являются школы, представляющие собой сложные организационно-технические системы (**ОТС**) (рис. 2). Организационной составляющей ОТС школы в соответствии с определением организационной системы как «объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил» [8] являются:

– коллектив учеников;

– педагогический коллектив;

– административно-управленческий персонал (управление на уровне школы, муниципалитета, региона и др.);

– родительская общественность и др.

Рис. 1. Управление школьным образованием РФ

Рис. 2. Структура ОТС школы

Эти элементы действуют на основании нормативно-правовых документов федерального, регионального и муниципального уровня, образовательных стандартов, учебных программ и др.

Технической составляющей системы школьного образования являются материально-технические (здания школ, оснащение школ) и информационные ресурсы, включающие в себя как средства хранения информации, так и саму информацию (образовательный контент, электронные дневники, ресурсы для проведения дистанционных занятий).

В соответствии с классификацией, представленной в [7], построенной на основе целеполагания системы, ОТС школы относится к первому классу: как «ОТС с заданными извне целями». Кроме того, это распределенные системы. Одним из признаков распределения является то, что ученики в сельских школах проживают в разных населенных пунктах. Как правило, в сельских районах ученики одного населенного пункта ходят в одну школу. В случае, когда ученики населенного пункта ходят в разные школы – одна восьмилетняя, другая десятилетняя, населенный пункт можно условно представить как два населенных пункта с учениками разного возраста. На рисунке 3 представлена структура распределения учеников населенных пунктов муниципалитета по его школам.

Теоретико-множественное представление школьного образования запишется следующим образом:

$R = \{r\},\ \ r = \overline{1, KR}$ – множество муниципалитетов (районов) региона;

$P = \{p\},\ \ p = \overline{1, KP}$ – множество населенных пунктов муниципалитета i; KP – число населенных пунктов в муниципалитете i;

$S_r = \{s\},\ \ s = \overline{1, KS}$ – множество школ муниципалитета i; KS – число школ в муниципалитете i;

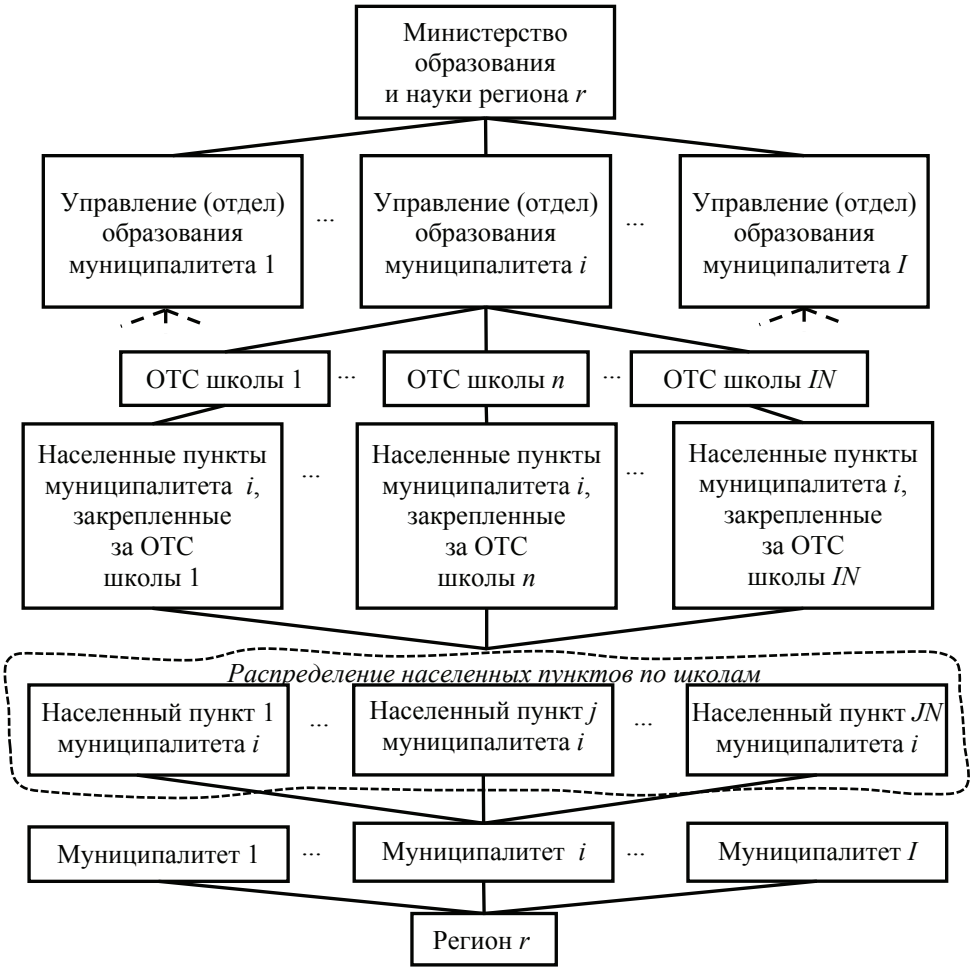


Рис. 3. Распределение учеников населенных пунктов муниципалитета по его школам

$GP_r = \{NP_r, SK_r, RG_r\}$, $r = \overline{1, KR}$ – двудольный граф закрепления населенных пунктов за школами;

$RG_r = \{r_{p,s}\}$, $r = \overline{1, KR}$, $p = \overline{1, KP}$, $s = \overline{1, KS}$ – матрица смежности населенных пунктов и школ муниципалитета r;

$$g_{p,s} = \begin{cases} 1, & \text{если населенный пункт } p \text{ закреплен за школой } s \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$D = \{d_{r,p}\}$, $r = \overline{1, KR}$, $p = \overline{1, KP}$ – число детей школьного возраста, проживающих в населенном пункте p муниципалитета r.

Задачи, решаемые элементами системы управления школьным образованием, определяются уровнем элемента в соответствии с рис. 1. Как было сказано выше, на образовательные результаты учеников влияют многочисленные факторы, в том числе и доступность качественного образования. Задача обеспечения равной доступности качественного школьного образования всем детям, независимо от места их проживания, решается на всех уровнях управления (федеральном,

региональном, муниципальном). Доступность качественного школьного образования напрямую зависит от финансирования. Финансовые ресурсы страны всегда ограничены, независимо от ее политического устройства, географического местоположения и т.д. В условиях ограниченности финансовых ресурсов возникает задача их распределения. При этом министерство (федеральный уровень) распределяет финансы по регионам, регионы – по муниципалитетам, а муниципалитет уже определяет, как тратить полученные ресурсы. Тем не менее за вышестоящими органами управления остается надзорная функция.

Финансовые ресурсы должны направляться в первую очередь в территории с наиболее неблагоприятными условиями школьного образования. Таким образом, для распределения финансирования необходимо решить задачу определения (поиска) территории с неблагоприятными условиями школьного образования. Причем на федеральном уровне такой территорией является регион, на региональном – муниципалитет, далее муниципалитет должен определить школы и населенные пункты, в которых наиболее неблагоприятные условия школьного образования.

В соответствии с принципом фрактальности ОТС [7], вышеуказанные задачи будут подобны для разных уровней управления образованием. Для их решения необходимо определить критерии оценки доступности качественного образования. На федеральном уровне по этим критериям оцениваются регионы, на региональном – муниципалитеты, на муниципальном – школы и населенные пункты.

Обозначим множество критериев определения доступности качественного образования $KR = \{kr_i\},\ i = \overline{1, I}$. Тогда задача определения территории с неблагоприятными условиями школьного образования заключается в следующем:

– *федеральный* уровень. Из множества регионов $R = \{r\},\ r = \overline{1, KR}$ найти такой регион $r^* \in R$, для которого $KR(r^*) = \underset{r \in R}{\text{extr}}(KR(r))$;

– *региональный* уровень. Из множества муниципалитетов заданного региона $M = \{m\},\ m = \overline{1, KM}$ найти такой муниципалитет $m^* \in M$, для которого $KR(m^*) = \underset{m \in M}{\text{extr}}(KR(m))$;

– *муниципальный* уровень:

1) из множества школ $S = \{s\},\ s = \overline{1, KS}$ заданного муниципалитета найти такую школу $s^* \in S$, для которой $KR(s^*) = \underset{s \in S}{\text{extr}}(KR(s))$;

2) из множества населенных пунктов $P = \{p\},\ p = \overline{1, KP}$ заданного муниципалитета найти такой населенный пункт $p^* \in P$, для которого $KR(p^*) = \underset{p \in P}{\text{extr}}(KR(p))$.

Постановка задачи определения школы с неблагоприятными условиями школьного образования

Вопросы определения доступности социальных объектов, в том числе общеобразовательных школ, отражены во многих зарубежных и отечественных публикациях [9 – 11].

Существующие методы определения доступности образования можно разделить на три класса:

– оценка экспертами. Например, методы независимой оценки качества образования (**НОКО**), в которых эксперты по заданной шкале оценивают вербальные показатели, такие как «открытость и доступность информации об образовательной организации, комфортность условий и доступность получения образовательной услуги» [12] и др.;

– анкетный опрос участников образовательного процесса и расчет количества ответов (процент ответов) на вопросы [13];

– расчет отдельных показателей, таких, например, как количество персональных компьютеров на 1000 обучающихся [14] или «доля школьных зданий, имеющих охрану», «численность обучающихся в расчете на одного учителя» и сведение их к одному обобщенному показателю [15].

В качестве критериев оценки условий школьного образования в сельской местности авторы используют следующие показатели, обоснование которых приведено в [16, 17]:

– нормированная средняя доступность школ;

– модифицированный коэффициент Джини;

– наличие «Точки роста» в школе TR_S ($TR_S = 0$, если «Точки роста» в школе нет, при ее наличии $TR_S = 1$).

В работе [16] дано описание постановки и решения задачи определения района (муниципалитета) с самыми неблагоприятными условиями школьного образования. При этом не решалась задача определения населенного пункта и школы с самыми неблагоприятными условиями школьного образования. Определение таких населенных пунктов и школ необходимо для выработки дальнейших действий по повышению доступности качественного школьного образования в районе. По сути, настоящая работа является продолжением работы [16].

Постановка задачи определения школы с самыми неблагоприятными условиями школьного образования заключается в следующем. Для заданного муниципалитета найти такую школу $s^* \in S$, для которой:

$$dostsr_{s^*} = \min_{s \in S}(dostsr_s);$$

$$G_{s^*} = \max_{s \in S}(G_s); \qquad (1)$$

$$TR_{s^*} = \min_{s \in S}(TR_s).$$

При следующих ограничениях:

$dostsr_s = \dfrac{\sum_{ps \in PS} dostsh_{ps} d_{ps}}{sd_s}$ – средняя доступность s-й школы;

$dostsh_{ps} = \dfrac{dost_{ps} - dost_{\min}}{dost_{\max} - dost_{\min}}$ – нормированная средняя доступность школы для ps-го населенного пункта;

$PS_s \subset P$ – множество населенных пунктов, закрепленных за s-й школой, $\bigcup_{s=1}^{KS} PS_s = P$, $\bigcap_{s=1}^{KS} PS_s = \varnothing$;

sd_s – число школьников в s-й школе;

d_{ps} – число школьников в ps-м населенном пункте;

$dost_{ps}$ – *доступность школы* для *ps*-го населенного пункта;

$dost_{\min}$, $dost_{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная возможная доступность школы.

Авторы [11] предложили использовать гравитационную модель для вычисления доступности медицинских учреждений, которая для расчета доступности школы принимает вид

$$dost_{ps} = \frac{m_{ps}}{d_{ps} t_{ps}^2};$$

m_{ps} – число мест в школе, которое предоставляется *ps*-у населенному пункту; d_{ps} – число учащихся в *ps*-м населенном пункте.

Введем обозначения:

t_{ps} – время ребенка в пути от дома до школы;

r_{ps} – расстояние между школой и *ps*-м населенным пунктом, м;

t_{ps} – время подъезда к школе учеников *ps*-го населенного пункта, ч;

t_{vv} – время выхода из дома и входа в школу, ч;

v_1, v_2 – средние скорости пешехода и автомобиля соответственно, км/ч;

rm – максимальное расстояние до школы, когда дети идут пешком, если оно больше, то необходим подвоз детей на автомобиле, м.

Теоретически максимальная величина доступности достигается при расстоянии до школы, равном нулю. Таким образом,

$$dost_{\min} = \frac{1}{t_{vv}^2}.$$

Минимальная величина доступности достигается при максимальном допустимом времени школьника в пути или при максимальном допустимом расстоянии до школы. Будем использовать максимальное допустимое время в пути $t_{\max}$, тогда

$$dost_{\max} = \frac{1}{tm^2},$$

где $tm = t_{vv} + t_{\max}$;

$$dost_{ps} = \begin{cases} \dfrac{m_{ps}}{d_{ps} t_{ps}^2}, \text{ если } m_{ps} < dt_{ps} \\ \dfrac{1}{t_{ps}^2}, \quad \text{ если } m_{ps} \geq dt_{ps}; \end{cases}$$

$$t_{ps} = t_{vv} + \frac{r_{ps}}{v_1 \cdot 1000}, \text{ если } r_{ps} \leq rm \text{, дети идут пешком;}$$

$$t_{ps} = t_{vv} + \frac{r_{ps}}{v_2 \cdot 1000} + tn, \text{ если } r_{ps} > rm \text{, подвоз детей на школьном автобусе;}$$

$m_{ps} = msh_s - dsh_s + d_{ps}$ – количество ученических мест для *ps*-го населенного пункта;

msh_s – мощность школы, обслуживающей *j*-й населенный пункт;

dsh_s – фактическое число учащихся в школе, обслуживающей *ps*-й населенный пункт;

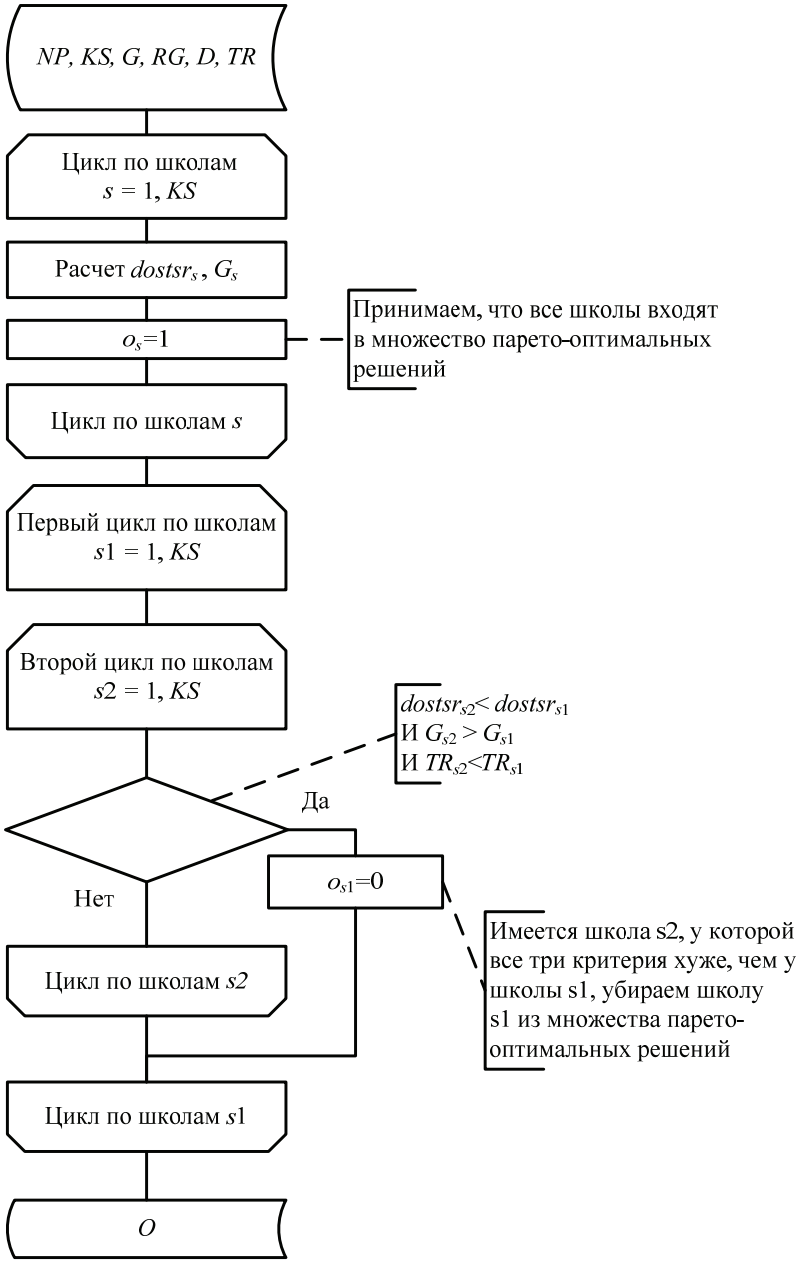


Рис. 4. Схема алгоритма поиска множества парето-оптимальных школ

tn – дополнительное время издержек при подвозе детей на школьном автобусе (время ожидания автобуса, дополнительное время в пути при скорости меньше 60 км/ч).

Коэффициент Джини для школы G_s

$$G_s = \frac{\sum_{j \in PS_s} \sum_{m \in PS_s} \left| dost_j - dost_m \right|}{2 \left| PS_s \right|^2 dostsr_s}.$$

Алгоритм решения задачи

Рассмотренная выше задача является многокритериальной и решается в *два этапа*. На *первом* этапе находится парето-оптимальное множество школ. На *втором* – из полученного множества выбирается одна или несколько школ, в зависимости от предпочтений, отдаваемых лицом, принимающим решение, тому или иному критерию.

Число школ и число населенных пунктов в муниципалитете имеют ограниченное значение – порядка десятков. Поэтому задачу поиска парето-оптимального множества школ можно решать последовательным сравнением критериев каждой школы со всеми остальными. Алгоритм заключается в следующем (рис. 4). Рассчитываем для каждой школы нормированную среднюю доступность и модифицированный коэффициент Джини. Принимаем, что все школы входят в множество парето-оптимальных значений. Далее выбираем первую школу ($s1 = 1$) и сравниваем ее критерии с критериями всех остальными школ (см. рис. 4 – второй цикл по школам). Если есть школа, у которой все три критерия хуже, чем у школы $s1$, то школу $s1$ убираем из множества парето-оптимальных школ ($o_{s1} = 0$). Делаем это сравнение для всех школ (см. рис. 4 – первый цикл по школам).

Для решения задачи на втором этапе будем использовать аддитивную свертку – обобщенный критерий, вычисляемый по формуле

$$KR_o = k1\, dostsr_o + k2(1 - G_o) + k3\, TR_o,\ o \in O, \tag{2}$$

где $k1$, $k2$, $k3$ – весовые коэффициенты, $k1 + k2 + k3 = 1$.

Таким образом, задача поиска школы в парето-оптимальном множестве заключается в следующем. Из множества заданных школ O найти такую школу $o^* \in O$, для которой обобщенный критерий оптимизации будет минимальным

$$KR_{o^*} = \min_{o \in O}(KR_o).$$

Пример расчета

Для решения поставленной выше задачи в среде SMath Solver (российский аналог MathCAD) разработана программа определения парето-оптимального множества решений по критериям оптимизации (1). Исходные данные для удобства работы формируются в электронной таблице MS Excel. Тестирование программы проводилось на школах десяти муниципальных округов Тамбовской области.

В таблице 1 представлены характеристики школ Мучкапского муниципального округа (**МО**), в таблице 2 – результаты расчета критериев (1). Парето-оптимальными не являются школы 1, 6, 9 (МБОУ Мучкапская СОШ, филиалы МБОУ Мучкапской СОШ – Кулябовский и Чащинский), то есть для каждой из этих школ в списке существует хотя бы одна, у которой все три критерия меньше. Это школы с относительно большим числом школьников.

Расчет обобщенного критерия (2) проводился для разных значений весовых коэффициентов (столбцы 6, 7, 8). Как видно из таблицы 2, для всех трех наборов весовых коэффициентов, оптимальной по критерию (2) является школа 4 (Арбеньевский филиал МБОУ Мучкапской СОШ).

Как видно из таблицы 2, кроме школы 4, низкая доступность образования в школах 2, 3, 7 (филиалы МБОУ Мучкапской СОШ – Андреевский, Андриановский, Сергиевский). Это школы с относительно низким числом учеников.

Таблица 1

Характеристики школ Мучкапского МО

Номер школы, s	Школа / филиал МБОУ Мучкапской СОШ	Мощность школы, msh_s	Число учащихся, dsh_s	Число населенных пунктов, $\lvert PS_s \rvert$
1	МБОУ Мучкапская СОШ	925	694	2
2	Андреевский	75	20	3
3	Андриановский	60	36	2
4	Арбеньевский	70	20	3
5	Краснокустовский	135	46	5
6	Кулябовский	135	84	2
7	Сергиевский	120	15	2
8	Троицкий	192	23	5
9	Чащинский	135	84	3
10	Шапкинский	165	96	2

Таблица 2

Результаты расчета критериев (1) и обобщенного критерия (2) для школ Мучкапского МО

Номер школы, s	$dostsh_s$	$1 - G_s$	TR_s	o_s	Обобщенный критерий KR_o		
					$k1$=0,333 $k2$=0,333 $k3$=0,333	$k1$=0,5 $k2$=0,5 $k3$=0,0	$k1$=0,4 $k2$=0,4 $k3$=0,2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,116	0,791	1	0	0,635	0,453	0,563
2	0,191	0,738	0	1	0,309	0,464	0,371
3	0,338	0,767	0	1	0,367	0,552	0,442
4	0,158	0,528	0	1	**0,228**	**0,343**	**0,274**
5	0,215	0,815	0	1	0,343	0,515	0,412
6	0,198	0,713	1	0	0,636	0,456	0,564
7	0,108	0,757	0	1	0,288	0,432	0,346
8	0,390	0,765	0	1	0,383	0,577	0,462
9	0,178	0,764	1	0	0,646	0,471	0,577
10	0,036	0,884	1	1	0,639	0,460	0,568

Заключение

Рассмотрена система школьного образования как организационно-техническая система с фрактальной структурой на федеральном, региональном, муниципальном и местном уровне управления. Предложены три критерия оценки доступности качественного школьного образования:

– нормированная средняя доступность школ;

– модифицированный коэффициент Джини;

– нормированное число учеников, которые учатся в школах, где есть «Точки роста».

Поставлена задача поиска территориального образования с наименьшей доступностью школьного образования: регион; муниципалитет; множество населенных пунктов муниципалитета, закрепленных за одной школой; населенный пункт. Показана, что задача является фрактальной для разных территориальных уровней. Предложен алгоритм решения задачи, состоящий из двух этапов: первый – поиск множества парето-оптимальных решений; второй – выбор одного или нескольких решений по обобщенному критерию, представляющему собой аддитивную свертку трех критериев. Приведен пример поиска школ с наихудшей доступностью образования для Мучкапского МО.

Результаты решения задачи используются для поддержки принятия решения при распределении финансовых ресурсов на разных уровнях управления образованием.

Список литературы

1. Стратегические приоритеты в сфере реализации государственной программы Российской Федерации «Развитие образования» до 2030 года (в ред. Постановления Правительства РФ от 07.10.2021 № 1701). – URL : https://docs.edu.gov.ru/document/f9321ccd1102ec99c8b7020bd2e9761f/download/4444/ (дата обращения: 18.03.2025).

2. Виноградов, В. Л. Модель оценки резильентности образовательной организации / В. Л. Виноградов, О. В. Шатунова // Вестник педагогических наук. – 2023. – № 5. – С. 222 – 227.

3. Международные сопоставительные исследования / ФГБУ Федеральный институт оценки качества образования. – URL : https://fioco.ru/ru/osoko/msi (дата обращения: 18.03.25).

4. Состояние естественнонаучного образования в российской школе по результатам международных исследований TIMSS и PISA / А. Ю. Пентин, Г. С. Ковалева, Е. И. Давыдова, Е. С. Смирнова // Вопросы образования. – 2018. – № 1. – С. 79 – 109. doi: 10.17323/1814-9545-2018-1-79-109

5. Кусаинов, А. К. Пути повышения качества образования / А. К. Кусаинов // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. – 2019. – № 1(58). – С. 81 – 86.

6. Определение условий повышения качества образования в сельских школах с низкими образовательными результатами / Ф. Ф. Гумерова, Л. А. Амирова, Г. И. Калимуллина [и др.] // Science for Education Today. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 85 – 107. doi: 10.15293/2658-6762.2301.05

7. Белов, М. В. Управление жизненными циклами организационно-технических систем / М. В. Белов, Д. А. Новиков. – М. : Ленанд, 2020. – 384 с.

8. Новиков, А. М. Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М. : СИНТЕГ. – 668 с.

9. Горелов, И. А. Компьютерные технологии при решении вопросов развития территорий городских муниципальных образований / И. А. Горелов, В. А. Немтинов // Информационное общество. – 2014. – № 1. – С. 49 – 54.

10. Юрова, К. И. Имитационная модель оптимального размещения предприятий сферы обслуживания / К. И. Юрова, Г. В. Судариков // Вестник университета Российской академии образования. – 2016. – № 3. – С. 115 – 119.

11. Kalogirou, S. Spatial Inequality in the Accessibility to Hospitals in Greece / S. Kalogirou // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. XLII-4/W2. – P. 91 – 94.

12. Поташева, О. В. Независимая оценка качества условий в образовании: от регионального инструмента экспертизы к единому порядку мониторинга / О. В. Поташева // E-Management. – 2023. – Т. 6, № 4. – С. 109 – 124. doi: 10.26425/2658-3445-2023-6-4-109-124

13. Пунанцев, А. А. Дифференциация качества общего образования в арктических моногородах в оценке участников образовательных отношений / А. А. Пунанцев // Арктика и инновации. – 2024. – Т. 2, № 1. – С. 65 – 70. doi: 10.21443/3034-1434-2024-2-1-65-70

14. Артемова, О. В. Методика оценки доступности инфраструктуры образования в регионах Российской Федерации / О. В. Артемова, Н. М. Логачева// Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 27 – 48. doi: 10.17072/1994-9960-2022-1-27-48

15. Пунанцев, А. А. К проблеме доступности качественного общего образования в российской Арктике: оценка условий реализации образовательных программ / А. А. Пунанцев, Д. Г. Левитес // Перспективы науки и образования. – 2022. – № 4(58). – С. 706 – 725. doi: 10.32744/pse.2022.4.41

16. Рачкова, С. А. Теоретико-множественный подход к оценке доступности качественного школьного образования в сельских районах / С. А. Рачкова, В. Г. Мокрозуб, В. В. Алексеев // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – № 1(95). – С. 95 – 99.

17. Рачкова, С. А. Автоматизированная поддержка принятия решений при определении сельского района с неблагоприятными условиями школьного образования / С. А. Рачкова, В. Г. Мокрозуб // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2023. – № 1. – С. 55 – 67. doi: 10.17308/sait/1995-5499/2023/1/55-67

A Multiple Theoretical Approach to Solving Problems of the Organizational and Technical System of School Education

S. A. Rachkova, V. G. Mokrozub✉

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

Keywords: accessibility of school education; multi-criteria problem; organizational and technical system; Pareto-optimal solution.

Abstract: The school education system is presented as a spatially distributed organizational and technical system with a fractal structure. A multi-criteria problem of finding a region, municipality or school with the least accessibility of quality school education is set, solved at the federal, municipal or local level. An algorithm for solving the problem and an example of calculation for the Muchkapsky municipal district of the Tambov region are proposed.

References

1. Available at: https://docs.edu.gov.ru/document/f9321ccd1102ec99c8b7020bd2e9761f/download/4444/ (accessed 18 March 2025).

2. Vinogradov V.L., Shatunova O.V. [Model for assessing the resilience of an educational organization], *Vestnik pedagogicheskikh nauk* [Bulletin of Pedagogical Sciences], 2023, no. 5, pp. 222-227. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Available at: https://fioco.ru/ru/osoko/msi (accessed 18 March 25).

4. Pentin A.Yu., Kovaleva G.S., Davydova Ye.I., Smirnova Ye.S. [The state of natural science education in Russian schools based on the results of international studies TIMSS and PISA], *Voprosy obrazovaniya* [Issues of Education], 2018, no. 1, pp. 79-109. doi: 10.17323/1814-9545-2018-1-79-109 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Kusainov A.K. [Ways to improve the quality of education], *Informatsionno-kommunikatsionnyye tekhnologii v pedagogicheskom obrazovanii* [Information and communication technologies in pedagogical education], 2019, no. 1(58), pp. 81-86. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Gumerova F.F., Amirova L.A., Kalimullina G.I. [et al.], [Determining the conditions for improving the quality of education in rural schools with low educational results], *Science for Education Today*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 85-107. doi: 10.15293/2658-6762.2301.05 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Belov M.V., Novikov D.A. *Upravleniye zhiznennymi tsiklami organizatsionno-tekhnicheskikh sistem* [Life Cycle Management of Organizational and Technical Systems], Moscow: Lenand, 2020, 384 p. (In Russ.)

8. Novikov A.M., Novikov D.A. *Metodologiya* [Methodology], Moscow: SINTEG, 668 p. (In Russ.)

9. Gorelov I.A., Nemtinov V.A. [Computer Technologies in Addressing Development Issues of Territories of Urban Municipalities], *Informatsionnoye obshchestvo* [Information Society], 2014, no. 1, pp. 49-54. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Yurova K.I., Sudarikov G.V. [Simulation model of optimal placement of service enterprises], *Vestnik universiteta Rossiyskoy akademii obrazovaniya* [Bulletin of the University of the Russian Academy of Education], 2016, no. 3, pp. 115-119. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Kalogirou S. Spatial Inequality in the Accessibility to Hospitals in Greece, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, vol. XLII-4/W2, pp. 91-94.

12. Potasheva O.V. [Independent assessment of the quality of conditions in education: from a regional examination tool to a single monitoring procedure], *E-Management*, 2023, vol. 6, no. 4, pp. 109-124. doi: 10.26425/2658-3445-2023-6-4-109-124 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Punantsev A.A. [Differentiation of the quality of general education in Arctic single-industry towns in the assessment of participants in educational relations], *Arktika i innovatsii* [Arctic and Innovations], 2024, vol. 2, no. 1, pp. 65-70. doi: 10.21443/3034-1434-2024-2-1-65-70 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Artemova O.V., Logacheva N.M. [Methodology for assessing the availability of educational infrastructure in the regions of the Russian Federation], *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika* [Bulletin of Perm University. Series: Economy], 2022, vol. 17, no. 1, pp. 27-48. doi: 10.17072/1994-9960-2022-1-27-48 (In Russ., abstract in Eng.)

15. Punantsev A.A., Levites D.G. [On the problem of accessibility of high-quality general education in the Russian Arctic: assessment of the conditions for the implementation of educational programs], *Perspektivy nauki i obrazovaniya* [Prospects of Science and Education], 2022, no. 4(58), pp. 706-725. doi: 10.32744/pse.2022.4.41 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Rachkova S.A., Mokrozub V.G., Alekseyev V.V. [Set-theoretical approach to assessing the availability of quality school education in rural areas], *Sistemy upravleniya*

i informatsionnyye tekhnologii [Control systems and information technologies], 2024, no. 1(95), pp. 95-99. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Rachkova S.A., Mokrozub V.G. [Automated support for decision-making in determining a rural area with unfavorable conditions for school education], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technology], 2023, no. 1, pp. 55-67. doi: 10.17308/sait/1995-5499/2023/1/55-67 (In Russ., abstract in Eng.)

Theoretisch-multipler Ansatz zur Lösung von Problemen des organisatorischen und technischen Systems der Schulbildung

Zusammenfassung: Das Schulbildungssystem ist als ein räumlich verteiltes organisatorisches und technisches System mit fraktaler Struktur dargestellt. Es ist das multikriterielle Problem der Suche nach einer Region, Gemeinde oder Schule mit dem geringsten Angebot an qualitativ hochwertiger Schulbildung gestellt, das auf föderaler, kommunaler oder lokaler Ebene gelöst wird. Es sind ein Algorithmus zur Lösung des Problems und ein Berechnungsbeispiel für den Muchkapsky-Gemeindebezirk der Region Tambow vorgeschlagen.

Approche théorique et multiple pour la résolution des problèmes du système organisationnel et technique de l'éducation scolaire

Résumé: Le système scolaire est présenté comme un système organisationnel et technique distribué dans l'espace avec une structure fractale. L'objectif est de trouver une région, une municipalité ou une école ayant le moins d'accès à une éducation de qualité, au niveau fédéral, municipal ou local. Sont proposés un algorithme de résolution de problème et un exemple de calcul pour le district municipal de Muchkap de la région de Tambov.

Авторы: ***Рачкова Светлана Анатольевна*** – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Мокрозуб Владимир Григорьевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 654.078
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.259-268

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СЕТЬЮ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СВЯЗИ

В. В. Алексеев[1]✉, Д. А. Иванов[2], И. Г. Рыжов[2]

Кафедра «Информационные системы и защита информации» (1), vvalex1961@mail.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; кафедра механики и процессов управления (2), ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Ключевые слова: алгоритмы управления; математическое моделирование; мобильная сеть; структура; управление.

Аннотация: В условиях ограниченности вычислительных ресурсов для оперативного перерасчета и оптимизации зон покрытия в реальном времени предложена стратегия контроля зон покрытия, основанная на интеграции существующих и разрабатываемых моделей и алгоритмов поддержки принятия решения по управлению зонами покрытия, обеспечивающая устойчивость мобильной связи. Данные алгоритмы помогут поддерживать устойчивость связи, адаптируясь к изменениям диаграммы направленности в реальном масштабе времени. Определен путь интеграции моделей и алгоритмов управления мобильной сетью связи, обеспечивающих устойчивость связи в условиях значительных инфраструктурных изменений, природных и техногенных катастроф, на основе системного подхода. Отмечено, что применение методов системного анализа при построении моделей и алгоритмов управления зонами покрытия мобильной сетью связи позволит интегрировать их в систему управления, что обеспечит непрерывность и оперативность принятия управленческих и технических решений.

Введение

С развитием информационных технологий и увеличением потребностей пользователей в улучшении качества и устойчивости систем мобильной сети связи одной из ключевых задач стало обеспечение стабильного покрытия и высокой эффективности функционирования систем мобильной сети связи в условиях неуверенного приема. Многочисленные исследования и разработки в области методов оптимизации параметров сотовых сетей подтверждают важность использования передовых технологий для поддержания устойчивости связи [1]. На практике организация структуры управления мобильной сетью часто осуществляется с использованием системного подхода, включающего математические модели и алгоритмы, которые учитывают различные параметры сети. Однако внедрение таких решений зачастую требует высокой квалификации специалистов и значительных изменений в существующей инфраструктуре [2]. Кроме того, традиционные методы управления мобильной сетью [3] не всегда эффективно справляются с динамическими изменениями городской среды и могут не учитывать все факторы, влияющие на устойчивость связи. Исходя из вышесказанного, внедрение новых моделей и алгоритмов управления позволит сократить время и повысить точность принятия решения по управлению мобильными сетями связи, что обеспечит устойчивость системы мобильной связи.

Базовая структура управления мобильной сетью связи

В 1982 году Конференция европейских администраций почт и телекоммуникаций CEPT (*англ.* Conference of European Post and Telecommunication) сформировала группу GSM (*англ.* Group Special Mobile) для изучения и разработки европейской мобильной наземной системы [4]. Управление мобильной сетью организовано через комплексную систему, включающую несколько уровней и подсистем, которые взаимодействуют между собой для обеспечения непрерывности и качества связи [5]. Рассмотрим структуру управления мобильной сетью, опираясь на схему, представленную в работе [6]. В отличие от источника в схему (рис. 1) добавлены подсистемы «Центр управления сетью» и «Административный центр», показано их взаимодействие внутри системы в целом. На начальном этапе исследуется общая структура системы, выделяются ее основные функциональные подсистемы и определяются взаимосвязи между ними. Это помогает понять, как различные подсистемы влияют на работу всей системы.

Рассмотрим подсистемы, представленные на схеме.

Абоненты сети используют мобильные станции (телефоны и другие устройства), которые перемещаются вместе с ними, для связи с базовыми станциями (**БС**).

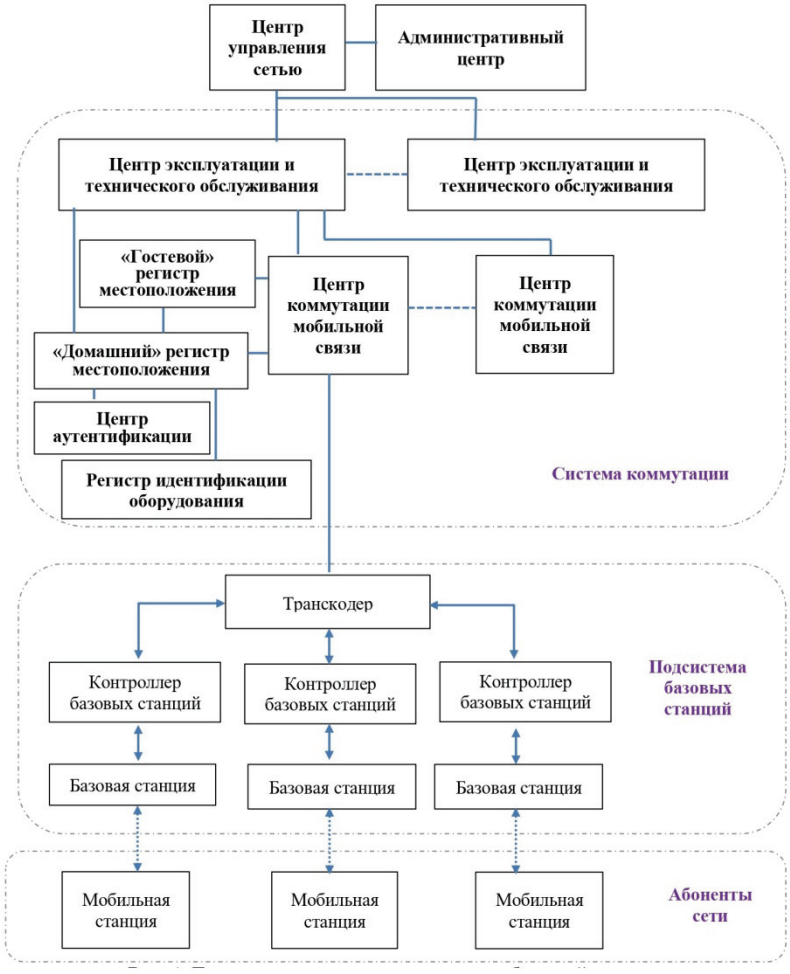


Рис. 1. Базовая структура управления мобильной сетью

Подсистема базовых станций состоит из двух основных компонентов: базовых станций и контроллеров базовых станций. Они взаимодействуют через стандартизированный интерфейс, разработанный ETSI/GSM для управления соединениями и оборудованием. Передача данных осуществляется цифровыми потоками на скорости 2,048 Мбит/с [7]. Базовые станции, являющиеся приемо-передающими устройствами, предназначены для обработки радиосигналов мобильных устройств и обеспечения связи в пределах их зоны покрытия.

В крупных городах, таких как Москва или Санкт-Петербург, количество базовых станций исчисляется тысячами, чтобы поддерживать высокую плотность абонентов. Для сельских районов, например, села Красноармейское в Саратовской области с численностью населения около 5000 человек, характерна меньшая концентрация базовых станций, обычно несколько единиц, что обеспечивает удовлетворительное покрытие. Ключевую роль в управлении подсистемой играет контроллер базовых станций (**КБС**), размещенный между базовыми станциями и транскодером. Контроллер базовых станций осуществляет управление распределением радиоканалов, обеспечивает устойчивость соединений, выполняет модуляцию и демодуляцию сигналов, а также кодирование и декодирование сообщений. Помимо этого, он организует очередность передачи данных, адаптирует скорость передачи для разных условий эксплуатации и поддерживает стабильность сети даже при увеличении нагрузки.

Функции транскодера включают преобразование цифровых потоков между базовыми станциями и ядром сети, что позволяет объединять сигналы для эффективной маршрутизации данных. Системный подход к управлению мобильной сетью связи обеспечивает устойчивость соединений и минимизирует потерю данных, особенно в условиях высокой нагрузки на сеть.

Система коммутации, основным звеном которой является центр коммутации мобильной связи (**ЦКМС**). Основными задачами ЦКМС являются отслеживание местоположения мобильных станций, обеспечение передачи сигнала при перемещении абонентов между зонами покрытия (сотами), маршрутизация вызовов, безопасность и тарификация [8]. Он обслуживает абонентов в определенной географической зоне (например, в Саратовской области). Центр коммутации мобильной связи использует «домашние» и «гостевые» регистры местоположения для отслеживания мобильных устройств, а также регистр идентификации оборудования и центр аутентификации для защиты и данных. Центр эксплуатации и технического обслуживания контролирует другие компоненты сети и устойчивость их работы, управляет аварийными сигналами, устраняет неисправности, контролирует состояние оборудования и нагрузку в сети, отвечает за обновление программного обеспечения и баз данных сети.

Центр управления сетью (**ЦУС**) связан с административным центром (муниципальным государственным органом) и позволяет обеспечивать рациональное иерархическое управление всей сетью [9]. Центр управления сетью отвечает за эксплуатацию и техническое обслуживание на уровне всей сети, поддерживаемой региональными центрами, собирая данные о текущем состоянии сети и анализируя изменения в зонах покрытия.

Существующие противоречия в организации системы управления

Интеграция с позиции системного анализа, моделей и алгоритмов управления мобильной сетью связи является актуальной задачей ввиду стремительного роста городской инфраструктуры и увеличения числа пользователей. Изменения городской среды, такие как строительство новых зданий и реконструкция дорог, ухудшают распространение радиосигналов, создавая «мертвые зоны» и формируя неустойчивую связь. Одновременно растущая нагрузка на сеть требует оперативного расширения ее возможностей и адаптации к изменяющимся условиям [10].

В условиях ограниченности вычислительных ресурсов и сложности моделирования реальной городской среды интеграция алгоритмов способна поддерживать устойчивость системы мобильной связи, адаптируясь к изменениям качества связи в реальном времени. Примером подобного подхода является использование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования нагрузки и адаптивного управления сетями связи [11].

В связи с этим предложено разработать модели и алгоритмы системы управления сетью, которые затем интегрируются в систему управления мобильной связью для повышения ее эффективности.

Предлагаемая структура управления системой мобильной связи

Интеграция новых моделей и алгоритмов управления в систему мобильной связи предполагает последовательное выполнение нескольких этапов, направленных на поддержание устойчивости сети в условиях динамически изменяющейся городской инфраструктуры [12]. На рисунке 2 представлен результат интеграции предлагаемых моделей и алгоритмов поддержки принятия решения в систему управления мобильной сетью связи.

Предполагается, что процесс интеграции моделей и алгоритмов управления зонами покрытия мобильной сети связи будет реализован в *пять этапов*.

Первый этап включает сбор данных о состоянии сети. Система управления получает информацию от ЦКМС, фиксируя показатели качества связи, нагрузки на сеть, наличие помех и другие критически важные параметры устойчивого состояния сети [13 – 15]. Эти данные формируют основу для последующих этапов анализа и принятия решений.

На *втором* этапе происходит анализ данных и оценка изменений в сети. Собранные данные обрабатываются с использованием математических моделей и алгоритмов, которые позволяют выявить текущие изменения в зонах покрытия, такие как ухудшение сигнала, увеличение нагрузки или появление «мертвых зон» [16]. Эти алгоритмы учитывают сложные взаимосвязи между параметрами сети и внешними факторами, влияющими на ее работу.

Третий этап предполагает разработку моделей и алгоритмов управления зонами покрытия мобильной сети связи. На основе проведенного анализа состояния системы мобильной связи сделан вывод о том, что необходимо разработать новые алгоритмы и модели, направленные на обеспечение устойчивого управления системой мобильной сети связи [17].

Разрабатываемые модели и алгоритмы должны обеспечивать в первую очередь поддержку принятия решения об изменении уровня сигнала в проблемных зонах покрытия, учитывающую изменения зон покрытия, вследствие воздействия негативных факторов. Поскольку влияние негативных факторов с точки зрения математики вносит условия неопределенности в принимаемое ращение, то разрабатываемые модели и алгоритмы поддержки принятия решения по управлению зонами покрытия системы мобильной связи должны быть построены с применением математического аппарата нечеткой логики, то есть теории принятия решений в условиях неопределенности. Поддержка принятия решения в таких условиях ориентирована на обеспечение стабильности и качества связи. Разрабатываемые модели и алгоритмы поддержки принятия решения, учитывая требования интеграции в систему управления мобильной сетью связи, не должны противоречить принципам ее построения, минимизируя влияние негативных факторов.

На *четвертом* этапе варианты предложенных решений анализируются лицом, принимающим решение (**ЛПР**). Принятый вариант решения по управлению зонами покрытия мобильной сети связи передается на исполнительные механизмы через центр управления сетью. В этом случае обеспечивается эффективное управление зонами покрытия мобильной сети связи вследствие того, что в принятом решении учтены как технические аспекты, так и возможные ограничения в материальных и временных ресурсах системы коммутации.

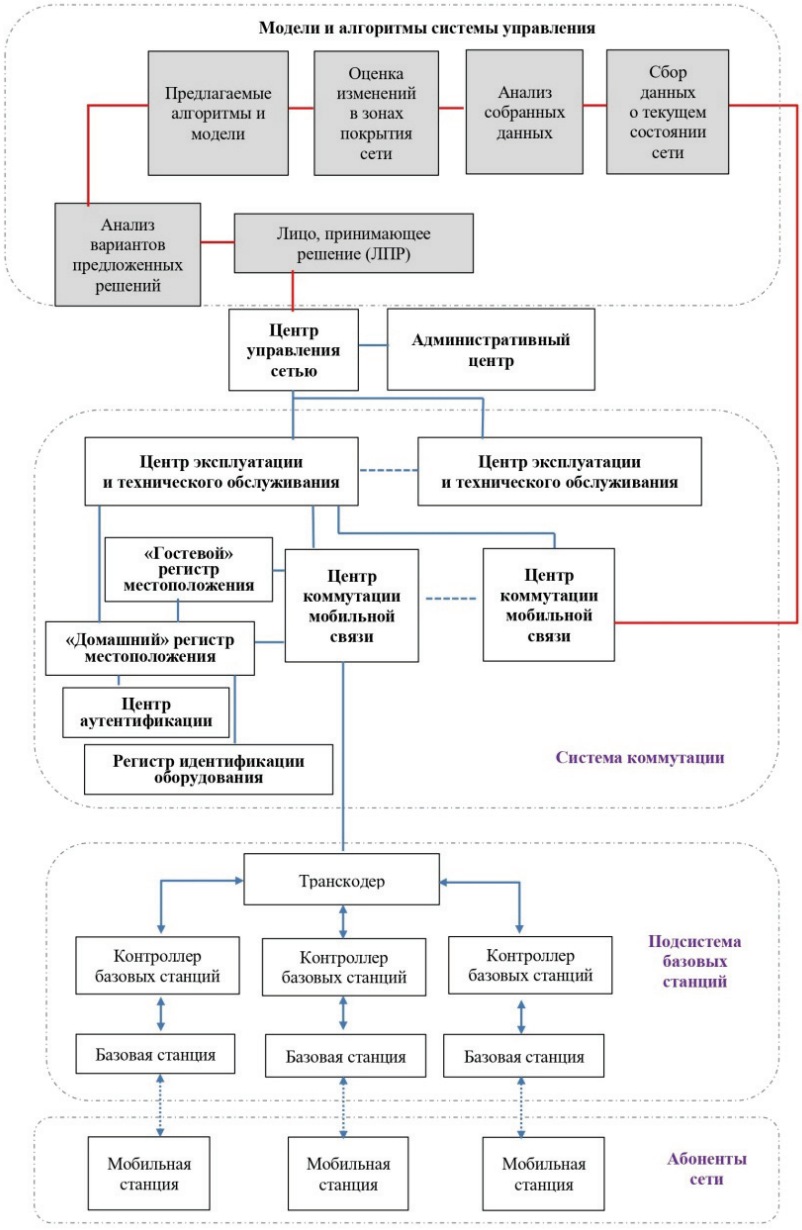


Рис. 2. Предлагаемая структура управления системой мобильной связи

Пятый этап включает реализацию принятого решения по управлению зонами покрытия мобильной сети связи через центр управления сетью. Оформленное установленным образом решение направляются через ЦУС и ЦКМС на подсистему базовых станций, где реализуется принятое решение. Реализация решения включает корректировку зоны покрытия, перераспределение нагрузки и устранение выявленных «мертвых зон» [18, 19]. Таким образом, интеграция новых моделей и алгоритмов по управлению зонами покрытия мобильной сети связи должна обеспечить непрерывную и оперативную поддержку принятия решения об изменениях зон покрытия в мобильной сети, поддерживая устойчивость связи даже в условиях значительных инфраструктурных изменений.

Применение метода декомпозиции позволило разделить систему мобильной связи на несколько ключевых подсистем, каждая из которых выполняет определенные функции [20]. Это дало возможность выделить критически важные функции подсистем структуры управления системой мобильной связи, такие как маршрутизация, управление частотными ресурсами и мониторинг состояния сети, и провести их детальный анализ. Такой подход помог выявить взаимозависимости между подсистемами системы управления мобильной сетью связи, что в дальнейшем обеспечит эффективное проектирование моделей и алгоритмов, интегрируемых в систему управления мобильной связью, для устойчивого управления зонами покрытия.

Ожидаемые результаты после внедрения

Применение системного подхода к анализу структуры управления мобильной сетью связи позволило определить элементы, неустойчивые к воздействию негативных факторов. В процессе анализа предметной области сделан вывод о недостаточной эффективности моделей и алгоритмов, обеспечивающих поддержку принятия решения в современных системах управления мобильной сетью связи, в частности, при организации поддержки принятия решений при адаптации структуры системы управления мобильной сетью связи к изменениям зон покрытия под воздействием негативных факторов.

Обоснована необходимость разработки моделей и алгоритмов поддержки принятия решения при действиях должностных лиц, обеспечивающих непрерывность и оперативность принятия решений при управлении мобильной сетью связи. Интеграция разрабатываемых моделей и алгоритмов в систему управления мобильной сетью связи позволит системе не только адаптироваться к условиям изменяющейся городской инфраструктуры и чрезвычайным ситуациям, таким, например, как природные катастрофы, но и обеспечить непрерывность и оперативность принятия решений при управлении мобильной сетью связи.

Заключение

Исследована структура управления системой мобильной сети связи, включая ее особенности. Выявлены противоречия в организации системы управления мобильной сетью связи. Мобильная сеть связи, в соответствии с методологией системного подхода, представлена целостной открытой системой. Такое представление обеспечило эффективное использование методов системного анализа в процессе исследования ее поведения в условиях изменения городской инфраструктуры и различных природных и техногенных катастроф. Применение метода иерархии четко определило роль каждого уровня управления для оптимизации зон покрытия. С помощью метода декомпозиции система разделена на подсистемы и проанализировано их взаимодействие, что помогло глубже понять влияние каждой подсистемы на работу системы в целом.

Организация принятия решения по изменению зон покрытия мобильной сетью связи невозможна без сбора и анализа данных, поступающих от центра коммутации мобильной связи, о состоянии сети, которые позволяют выявлять изменения в зонах покрытия и оценивать влияние негативных факторов на устойчивость системы в целом. Разрабатываемые модели и алгоритмы, интегрируемые в систему управления мобильной сетью связи должны обеспечивать организацию поддержки принятия управленческих и технических решений для оптимизации зон покрытия, что обеспечит устойчивость функционирования мобильной сети связи.

Для обеспечения устойчивости системы мобильной связи через центр управления сетью целесообразно разработать новые модели и алгоритмы с применением математического аппарата нечеткой логики, в частности темпоральной.

Список литературы

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

2. Оптимизация зоны покрытия сети сотовой связи на основе математического программирования / И. А. Зикратов, Ф. Н. Шаго, А. В. Гуртов, И. И. Иванинская // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 313 – 321.

3. Рожкова, А. А. Формирование оптимальной зоны покрытия в сотовых системах связи / А. А. Рожкова // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-2. – С. 54 – 54.

4. Англо-русский толковый словарь сокращений в области связи, компьютерных и информационных технологий: около 35 000 терминов / Н. Н. Слепов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 2005. – 794 с.

5. Гадисова, А. М. Обзор современных систем управления сетями связи и их применения / А. М. Гадисова // Молодой ученый. – 2022. – № 6(401). – С. 9 – 11.

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

7. Комагоров, В. П. Архитектура сетей и систем телекоммуникаций: учеб. пособие / В. П. Комагоров. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. – 146 с.

8. Попов, В. И. Основы проектирования сотовых сетей мобильной связи / В. И. Попов, В. А. Скуднов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2019. – 400 с.

9. Буснюк, Н. Н. Системы мобильной связи : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1–98 01 03 «Программное обеспечение информационной безопасности» / Н. Н. Буснюк, Г. И. Мельянец. – Минск : БГТУ, 2018. – 153 с.

10. Легков, К. Е. Организация процессов управления инфокоммуникационными сетями специального назначения / К. Е. Легков // T-Comm. – 2015. – № 2. – С. 20 – 29

11. Канивец, З. С. Обзор способов применения методов машинного обучения к программно-конфигурируемым сетям / З. С. Канивец, А. И. Выборнова // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 11 – 21.

12. Пятибратов, А. П. Вычислительные машины, сети и телекоммуникационные системы: учеб.-метод. комплекс / А. П. Пятибратов, Л. П. Гудыно, А. А. Кириченко ; под ред. А. П. Пятибратова. – М. : Изд. центр ЕАОИ, 2009. – 292 с.

13. Predicting malfunction of mobile network base station using machine learning approach / Y.-H. Liu, Y.-C. Tu, C.-Y. Hsu, H.-C. Chao. //2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 18 – 20 September, Matsue, Japan, 2019. – P. 1 – 4. doi: 10.23919/apnoms.2019.8892894

14. Kumar, Y. Fault Prediction and Reliability Analysis in a Real Cellular Network / Y. Kumar, H. Farooq, A. Imran // Proc. 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Valencia, Spain, 2017. – P. 1090 – 1095. doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986437

15. A machine learning approach for predictive maintenance for mobile phones service providers / A. Corazza, F. Isgro, L. Longobardo, R. Prevete // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies (LNDECT); International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. – Springer International Publishing, 2017. – Vol. 1. – P. 717 – 726. doi: 10.1007/978-3-319-49109-7_69

16. Inspection plan prediction for multi-repairable component systems using neural network / N. Yousefia, S. Tsianikasa, J. Zhoua, D. W. Coit // Proc. IISE Annual Conference / L. Cromarty, R. Shirwaiker, P. Wang (Eds.); Institute of Industrial and Systems Engineers, IISE, Virtual, Online, United States. 2020. doi: 10.48550/arXiv.2001.09015

17. Райли, Д. NGOSS. Построение эффективных систем поддержки и эксплуатации сетей для оператора связи / Д. Райли, М. Кринер. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 192 с.

18. OSS/BSS – базовое программное обеспечение в телекоме [OSS/BSS – basic software in telecom]. – URL : https://www.kommersant.ru/doc/2594410 (дата обращения: 14.02.2025).

19. Система поддуржки деятельности операторов связи (OSS) [Operation support system for communications operators]. – URL : https://www.nvg.ru/solutions-and-services/resheniya-oss- bss/sistemy-podderzhkideyatelnosti-operatorov-svyazi-oss (дата обращения: 14.02.2025).

20. О декомпозиции автоматизированных систем управления. Синтез подсистем автоматики / РИТМ ПРО. – URL : https://ritm.pro/dekompozicija-avtomatizirovannyh-sistem-upravlenija-sintez-podsistem-avtomatiki (дата обращения: 14.02.2025)

A System Approach to Organizing Mobile Network Management Structure to Ensure Communication Stability

V. V. Alekseev[1]✉, D. A. Ivanov[2], I. G. Ryzhov[2]

Department of Information Systems and Information Security (1), vvalex1961@mail.ru, TSTU, Tambov, Russia; Department of Mechanics and Control Processes (2), Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Keywords: control algorithms; mathematical modeling; mobile network; structure; management.

Abstract: In conditions of limited computing resources for operational recalculation and optimization of coverage areas in real time, a coverage area control strategy is proposed based on the integration of existing and developed models and algorithms for decision support for coverage area management, ensuring the stability of mobile communications. These algorithms will help maintain communication stability by adapting to changes in the directional diagram in real time. The path of integration of models and algorithms for mobile network management, ensuring the stability of communications in conditions of significant infrastructural changes, natural and man-made disasters, based on a systems approach is determined. It is noted that the use of systems analysis methods in constructing models and algorithms for managing mobile network coverage areas will allow integrating them into the control system, which will ensure the continuity and efficiency of making management and technical decisions.

References

1. L'vovich Ya.Ye., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Avetisyan T.V. [Modeling and optimization of information and telecommunication systems management processes], *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2024, vol. 29, no. 3, pp. 41-48. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Zikratov I.A., Shago F.N., Gurtov A.V., Ivaninskaya I.I. [Optimization of cellular network coverage area based on mathematical programming], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2015, vol. 15, no. 2, pp. 313-321. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Rozhkova A.A. [Formation of optimal coverage area in cellular communication systems], *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2014, no. 5-2, pp. 54-54. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Slepov N.N. *Anglo-russkiy tolkovyy slovar' sokrashcheniy v oblasti svyazi, komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy: okolo 35 000 terminov* [English-Russian explanatory dictionary of abbreviations in the field of communications, computer and information technologies: about 35,000 terms], Moscow: Radio i svyaz', 2005, 794 p. (In Russ.)

5. Gadisova A.M. [Review of modern communication network management systems and their applications], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2022, no. 6(401), pp. 9-11. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Berlin A.N. *Tsifrovyye sotovyye sistemy svyazi* [Digital cellular communication systems], Moscow: Eko-Trendz, 2007, 292 p. (In Russ.)

7. Komagorov V.P. *Arkhitektura setey i sistem telekommunikatsiy: ucheb. posobiye* [Architecture of networks and telecommunication systems: textbook], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008, 146 p. (In Russ.)

8. Popov V.I., Skudnov V.A. *Osnovy proyektirovaniya sotovykh setey mobil'noy svyazi* [Fundamentals of designing cellular networks of mobile communications], Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2019, 400 p. (In Russ.)

9. Busnyuk N.N., Mel'yanets G.I. *Sistemy mobil'noy svyazi: ucheb.-metod. posobiye* [Mobile communication systems], Minsk: BGTU, 2018, 153 p. (In Russ.)

10. Legkov K.Ye. [Organization of control processes for special-purpose infocommunication networks], *T-Comm*, 2015, no. 2, pp. 20-29 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Kanivets Z.S., Vybornova A.I. [Review of methods for applying machine learning methods to software-defined networks], *Informatsionnyye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information technology and telecommunications], 2021, vol. 9, no. 3, pp. 11- 21. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Pyatibratov A.P. (Ed.), Gudyno L.P., Kirichenko A.A. *Vychislitel'nyye mashiny, seti i telekommunikatsionnyye sistemy: ucheb.-metod. kompleks* [Computers, networks and telecommunication systems: training and methodological complex], Moscow: Izd. tsentr YEAOI, 2009, 292 p. (In Russ.)

13. Liu Y.-H., Tu Y.-C., Hsu C.-Y., Chao H.-C. Predicting malfunction of mobile network base station using machine learning approach, *2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium* (APNOMS), 18 – 20 September, Matsue, Japan, 2019, pp. 1-4. doi: 10.23919/apnoms.2019.8892894

14. Kumar Y., Farooq H., Imran A. Fault Prediction and Reliability Analysis in a Real Cellular Network, *Proc. 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference* (IWCMC), Valencia, Spain, 2017, pp. 1090-1095. doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986437

15. Corazza A., Isgro F., Longobardo L., Prevete R. A machine learning approach for predictive maintenance for mobile phones service providers, *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (LNDECT); International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, Springer International Publishing, 2017, vol. 1, pp. 717-726. doi: 10.1007/978-3-319-49109-7_69

16. Yousefia N., Tsianikasa S., Zhoua J., Coit D.W. Inspection plan prediction for multi-repairable component systems using neural network, *Proc. IISE Annual Conference*, L. Cromarty, R. Shirwaiker, P. Wang (Eds.); Institute of Industrial and Systems Engineers, IISE, Virtual, Online, United States. 2020. doi: 10.48550/arXiv.2001.09015

17. Rayli D., Kriner M. *NGOSS. Postroyeniye effektivnykh sistem podderzhki i ekspluatatsii setey dlya operatora svyazi* [NGOSS. Building Effective Network Support and Operation Systems for a Telecom Operator], Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2007, 192 p. (In Russ.)

18. OSS/BSS – basic software in telecom, available at: https://www.kommersant.ru/doc/2594410 (accessed 14 February 2025).

19. Operation support system for communications operators, available at: https://www.nvg.ru/solutions-and-services/resheniya-oss-bss/sistemy-podderzhkideyatelnosti-operatorov-svyazi-oss (accessed 14 February 2025).
20. available at: https://ritm.pro/dekompozicija-avtomatizirovannyh-sistem-upravlenija-sintez-podsistem-avtomatiki (accessed 14 February 2025)

Systematischer Ansatz zur Organisation der Mobilnetz-Managementstruktur im Interesse der Sicherstellung der Kommunikationsstabilität

Zusammenfassung: Unter den Bedingungen begrenzter Rechenressourcen für die operative Neuberechnung und Optimierung von Versorgungsbereichen in Echtzeit ist eine Strategie zur Überwachung von Versorgungsbereichen vorgeschlagen, die auf der Integration bestehender und entwickelter Modelle und Algorithmen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Verwaltung von Versorgungsbereichen basiert und so die Stabilität der Mobilkommunikation gewährleistet. Diese Algorithmen tragen dazu bei, die Kommunikationsstabilität aufrechtzuerhalten, indem sie sich in Echtzeit an Änderungen im Strahlungsmuster anpassen. Es ist ein Weg zur Integration von Modellen und Algorithmen für die Verwaltung des Mobilfunknetzes definiert, der auf einem systemischen Ansatz basiert und die Stabilität der Kommunikation unter Bedingungen erheblicher Infrastrukturänderungen sowie Natur- und von Menschen verursachter Katastrophen sicherstellt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Verwendung von Methoden der Systemanalyse beim Aufbau von Modellen und Algorithmen zur Verwaltung der Abdeckungsbereiche mobiler Netzwerke, deren Integration in das Managementsystem ermöglicht, wodurch die Kontinuität und Effizienz der technischen und Managemententscheidungen sichergestellt wird.

Approche systématique pour la structure de gestion du réseau mobile pour assurer la stabilité des communications

Résumé: Compte tenu de la rareté des ressources informatiques, est proposée une stratégie de contrôle des zones de couverture, fondée sur l'intégration de modèles existants et en cours de développement et d'algorithmes d'aide à la décision pour la gestion des zones de couverture, pour le recalcul rapide et l'optimisation en temps réel des zones de couverture. Ces algorithmes aident à maintenir la stabilité de la communication en s'adaptant aux changements de directivité en temps réel. Est définie la voie à suivre pour intégrer les modèles et les algorithmes de gestion du réseau de communication mobile qui garantissent la durabilité des communications face à des changements d'infrastructure importants, à des catastrophes naturelles et à des catastrophes d'origine humaine, sur la base d'une approche systémique. Est noté que l'application des méthodes d'analyse des systèmes aux modèles et aux algorithmes de gestion des zones de couverture du réseau mobile permettrait de les intégrer dans le système de gestion, ce qui garantirait la continuité et la rapidité des décisions de gestion et techniques.

Авторы: ***Алексеев Владимир Витальевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; ***Иванов Дмитрий Александрович*** – аспирант кафедры механики и процессов управления; ***Рыжов Илья Геннадьевич*** – аспирант кафедры механики и процессов управления, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», Москва, Россия.

УДК 662.758.2:66.063.61
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.269-280

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

М. А. Промтов✉, В. Г. Желудков, Н. Ц. Гатапова, А. Ю. Степанов

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», promtov.ma@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: размер частиц; роторный импульсный аппарат; удельная потребляемая мощность; циклы обработки; частота вращения; эмульсия.

Аннотация: Рассмотрена методика расчета максимального диаметра частиц эмульсии на основе модели Хинце, описывающей процесс диспергирования капель эмульсии в турбулентном потоке с применением теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова. Максимальный размер устойчивых капель в эмульсии с низкой концентрацией дисперсной фазы зависит от ее физических параметров и потребляемой мощности, отнесенной к единице массы эмульсии. Проведены экспериментальные исследования по диспергированию подсолнечного масла в дистиллированной воде при обработке в роторном импульсном аппарате (РИА) с целью получения 10%-ной эмульсии. Получены экспериментальные зависимости среднего диаметра частиц эмульсии от частоты вращения ротора и количества циклов обработки эмульсии в РИА. Установлено, что для РИА с частотой вращения ротора 50…80 об/с эмпирический коэффициент соотношения среднего диаметра частиц исследованной эмульсии и расчетного максимального диаметра устойчивой частицы эмульсии равен 0,2 ± 0,1.

Введение

Эмульсии представляют собой коллоидные дисперсии, которые состоят как минимум из двух несмешивающихся жидкостей, причем одна из них диспергирована в другой в виде мелких капель. Эмульсионные системы используются в различных отраслях промышленности, таких как химическая (краски, пропитки, присадки, получение полимеров, пестицидов, взрывчатых веществ, массообменные процессы и др.), пищевая (молоко, сливки, соусы, заправки, майонез, маргарин и т.п.), фармацевтическая (мази, бальзамы, микстуры, инкапсулированные лекарства, биологически-активные добавки и т.п.), косметическая (молочко, мази, лосьоны, крема и др.) [1, 2].

Одним из наиболее информативных показателей качества эмульсий служат размеры частиц: средний арифметический, средний объемно-поверхностный, максимальный и другие статистические виды размеров, а также распределение частиц по размерам, которое влияет на другие характеристики, включая реологические свойства, внешний вид, стабильность и т.д. Как правило, эмульсии подраз-

деляются на три класса: макроэмульсии (размер капель 0,1…5 мкм), миниэмульсии (20…100 нм) и наноэмульсии (5…50 нм) [1, 2].

Для приготовления эмульсий применяются различные технологии и оборудование, начиная от циркуляционного метода при течении жидкостей по трубопроводам, статическим смесителям. Широко применяются роторные устройства различной конструкции (роторно-пульсационные и роторные импульсные аппараты, коллоидные мельницы), емкости с мешалками, а также гомогенизаторы высокого давления, ультразвуковые генераторы и мембранные методы эмульгирования [1, 3]. Образование эмульсии без специальных поверхностно-активных веществ не может происходить самопроизвольно, и для образования и дробления капель требуется энергия. При выборе технологии и оборудования для получения эмульсии определенного вида с прогнозируемыми параметрами стоит задача расчета размеров частиц. Образование относительно крупных капель (несколько мкм), как в случае с макроэмульсиями, требует относительно небольших удельных затрат энергии, и поэтому для получения макроэмульсии достаточно высокоскоростных мешалок или роторных устройств. Образование мелких капель (субмикронных, как в случае с наноэмульсиями) затруднено, и для этого требуется большое количество поверхностно-активного вещества и(или) энергии [1, 3].

Теоретическая часть

В промышленности для получения тонкодисперсных эмульсий, как правило, применяется оборудование с интенсивным гидродинамическим воздействием, создающим турбулентный режим течения макро- и микропотоков в обрабатываемом объеме жидкости [3]. Для расчета размеров частиц эмульсии, получаемой при турбулентном режиме течения, часто применяют подходы, предложенные в работах [4 – 6].

На основе теории локально-изотропной турбулентности А. Н. Колмогорова [4, 7] модель диспергирования капель эмульсии в турбулентном потоке была разработана Д. О. Хинце [5]. Основной постулат теории Колмогорова – это перенос турбулентной кинетической энергии без ее диссипации от крупных формирований (вихрей) к более мелким в системе с однородной изотропной турбулентностью. Диспергирование капли в турбулентной зоне происходит при преобладании мгновенных напряжений на поверхности капли над силами поверхностного натяжения и вязкости капли.

Напряжение, возникающее при деформации капли размером d, определяется как [6]

$$\tau_c = \rho \overline{V}_d^2 = \rho \int_{1/d}^{\infty} E(k)\,dk \,, \qquad (1)$$

где ρ – плотность сплошной фазы, кг/м^3; $\overline{V}_d^2$ – среднеквадратичная разность скоростей на поверхности капли диаметром d, м^2/с^2; $E(k)$ – функция спектральной плотности энергии, k – волновое число или обратная длина вихря, м$^{-1}$. Здесь учитывается только энергия, содержащаяся в вихрях с масштабом меньше $k = 1/d$. Более крупные вихри не деформируют каплю, а перемещают ее в объеме сплошной среды.

Развитое турбулентное течение жидкости характеризуется наложением на осредненный направленный поток случайных пульсаций скорости с переменными направлением и амплитудой [3]. В однородной и изотропной турбулентной среде значение пульсаций скорости за достаточно большие промежутки времени равно нулю [4]. В связи с этим пульсационное движение масштаба $\lambda_0 << \lambda << \lambda_{max}$ характеризуется среднеквадратичным значением пульсационной скорости

$$\overline{V} = \sqrt{V_\lambda^2}\,, \tag{2}$$

где λ – расстояние, на котором мгновенное значение скорости изменяется на величину V_λ, м; λ_0, λ_{max} – соответственно критический и максимальный масштабы пульсаций.

В масштабах $\lambda_0 < \lambda$ пульсационная скорость определяется законом «двух третей» Колмогорова–Обухова [7, 8]

$$\overline{V}_\lambda^2 \approx (\varepsilon\lambda)^{2/3}, \tag{3}$$

где ε – локальное значение энергии потока, Вт/кг.

Пульсационная скорость может рассматриваться как разность мгновенных значений скорости в точках, отстоящих одна от другой на расстоянии λ. Пульсации с масштабом, соотнесенным с размером капли d, будут создавать в противоположных точках поверхности капли разность динамических напоров

$$\Delta P_d = \rho V_d^2 / 2, \tag{4}$$

где V_d – скорость на поверхности капли, м/с.

Для скоростей рассеивания энергии, которые обычно наблюдаются в аппаратах с турбулентным режимом эмульгирования, конечные размеры капель малы по сравнению с макромасштабом турбулентности, но велики по сравнению с микромасштабным вихрем [4]

$$\lambda_0 = \left(\eta^3 / \varepsilon\right)^{1/4}, \tag{5}$$

где η – кинематическая вязкость сплошной фазы, м^2/с.

Вихри, которые взаимодействуют с каплями, попадают в инерционный поддиапазон турбулентности, $d \approx \lambda$. Эти вихри локально изотропны, и $E(k)$ может быть описано с помощью теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова с учетом предположения, что $\lambda_0 << d << \lambda_{max}$ [7, 9]

$$E(k) = C_k \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}, \tag{6}$$

где $C_k \sim 1{,}5$ – константа Колмогорова. Подставляя (6) в выражение (1), получим

$$\tau_c \approx \rho\, \varepsilon^{2/3}\, d^{2/3}. \tag{7}$$

Необходимо отметить, что ε – фактически локальная скорость рассеивания энергии, которая широко варьируется для оборудования с турбулентным режимом эмульгирования.

Силы сцепления, обусловленные межфазным натяжением и вязкостью, препятствуют деформации капли. Поверхностная сила на единицу площади определяется как

$$\tau_s \approx \sigma / d, \tag{8}$$

где σ – поверхностное натяжение, Дж/м^2.

Согласно О. Д. Хинце [5], вязкое напряжение внутри капли равно

$$\tau_d \approx \mu_d \frac{(\tau_c / \rho_d)^{1/2}}{d}. \tag{9}$$

Это закон вязкости Ньютона, в соответствии с которым характерная скорость внутри капли $(\tau_c / \rho_d)^{1/2}$ связана с турбулентным напряжением на ее поверхности [6], здесь ρ_d – плотность капли, кг/м^3.

Анализ уравнений (7) – (9) показывает, что существует максимальный стабильный размер капли d_{max}, при превышении которого разрушающие силы достаточны для диспергирования капли, а при снижении капля стабилизируется за счет поверхностных и внутренних вязких сил [6]. При $d = d_{max}$ динамические силы на поверхности капли уравновешивают силы сцепления

$$\tau_c = \tau_s + \tau_d \,. \tag{10}$$

Для капель, устойчивых в турбулентном потоке, справедливо равенство

$$\rho \frac{V^2}{2} = 4\sigma / d \,. \tag{11}$$

Если дисперсная фаза в эмульсии имеет низкую вязкость, то величина τ_d незначительна, и только поверхностная сила способствует устойчивости капли. Согласно уравнению (10), приравняем (7) и (8). После преобразований получаем [6]

$$d_{max} = C_1 (\sigma/\rho)^{3/5} \varepsilon_{max}^{-2/5} \,, \tag{12}$$

где константа C_1 определяется эмпирическим путем.

Максимальный стабильный размер капель не будет достигнут до тех пор, пока все капли дисперсной фазы не окажутся в области потока с наибольшей энергией. Следовательно, d_{max} определяется максимальной скоростью рассеивания энергии [6]. Исходя из этого положения в уравнении (12) используется параметр ε_{max}. Кроме того, для достижения равновесия потребуется большое количество проходов через активную турбулентную зону или последовательное многократное прохождение капель эмульсии через несколько зон обработки потока эмульсии в турбулентном режиме.

Для геометрически аналогичных турбулентных систем ε_{max} рассматривается как среднее значение, и этот параметр может быть определен потребляемой мощностью, отнесенной к единице массы эмульсии. Для эмульсионных систем с никой концентрацией дисперсной фазы равновесный диаметр капель эмульсии будет определятся размером d_{max} и меньше.

Экспериментальная часть

Для определения влияния удельных затрат мощности на размер капель эмульсии с низкой концентрацией дисперсной фазы и малой вязкостью проведены экспериментальные исследования по эмульгированию подсолнечного масла в дистиллированной воде при обработке в роторном импульсном аппарате РИА-150. Конструктивная схема РИА-150 показана на рис. 1, геометрические параметры приведены ниже [10]:

Радиус ротора $R_р$, мм	75
Ширина прямоугольного канала ротора, статора a, мм	3
Высота прямоугольного канала ротора, статора, мм	16
Длина канала, мм	
ротора $l_р$	12
статора $l_с$	16
Число каналов в роторе, статоре	18
Зазор между ротором и статором δ, мм	0,1
Радиус рабочей камеры R_k, мм	130

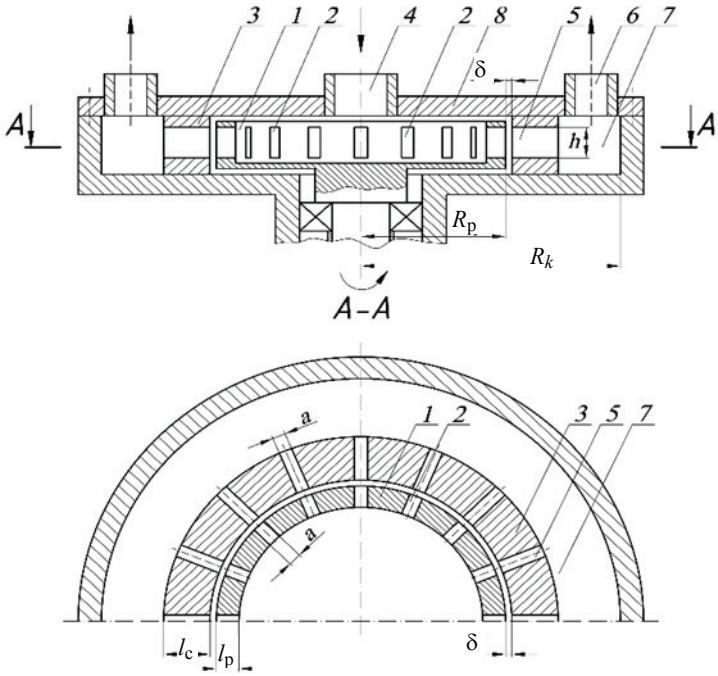


Рис. 1. Конструктивная схема роторного импульсного аппарата:
1 – ротор; *2* – каналы ротора; *3* – статор; *4* – входной патрубок; *5* – каналы статора; *6* – выходной патрубок; *7* – рабочая камера; *8* – крышка

Технологическая схема установки на базе РИА-150 представлена на рис. 2. Установка включает в себя РИА, насос, емкость для эмульсии, приборы для измерения расхода, давления и температуры. Скорости вращения валов насоса, РИА регулировались частотными преобразователями. Обработка осуществлялась перекачиванием эмульсии из емкости насосом под давлением в РИА и обратно в емкость.

Соотношения воды и масла в эмульсии принималось как 9 : 1. Использовалась дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144–2018 «Вода дистиллированная. Технические условия» и подсолнечное рафинированное масло, соответствующее ГОСТ 1129–2013 «Масло подсолнечное. Технические условия». Масса обрабатываемой эмульсии в установке составляла 10 кг.

Дистиллированная вода заливалась в емкость установки и с помощью частотного преобразователя создавалась небольшая подача насоса (≈ 1 л/мин), в емкость добавлялось подсолнечное масло и проводилось циркуляционное перемешивание для получения грубодисперсной эмульсии в течение 2 циклов оборота эмульсии через гидравлическую систему при отсутствии вращения ротора РИА и совмещенных каналах ротора и статора. Затем производили отбор пробы грубодисперсной исходной эмульсии.

Для обработки эмульсии в установке с помощью частотных преобразователей электродвигатели насоса и РИА разгоняли до заданной частоты вращения. Обработка эмульсии проходила в циклическом режиме за счет циркуляции эмульсии по замкнутому гидравлическому контуру из емкости в насос, затем под давлением в РИА и обратно в емкость. Число циклов обработки определялось по счетчику жидкости. За время обработки фиксировался объем жидкости, прошедший через РИА, температура эмульсии и давление на входе в аппарат. Эмульсию обрабатывали при средней подаче в РИА равной (6,5 ± 0,4) л/мин и давлении на входе в РИА (0,26 ± 0,02) МПа.

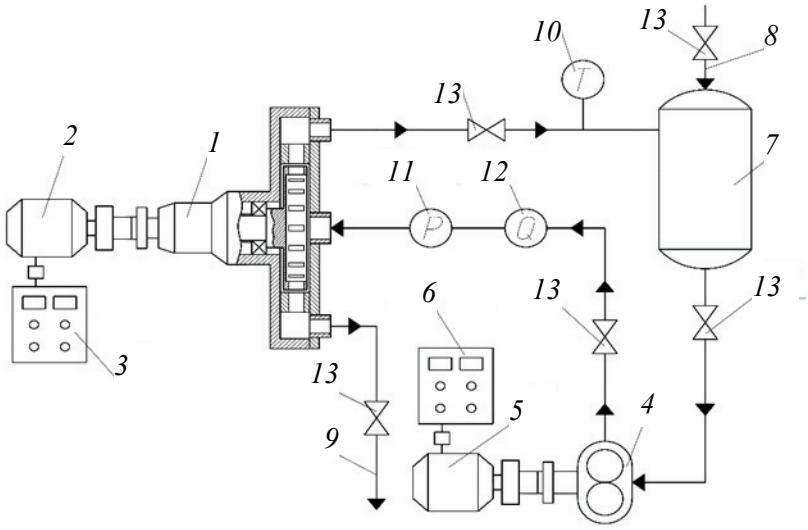


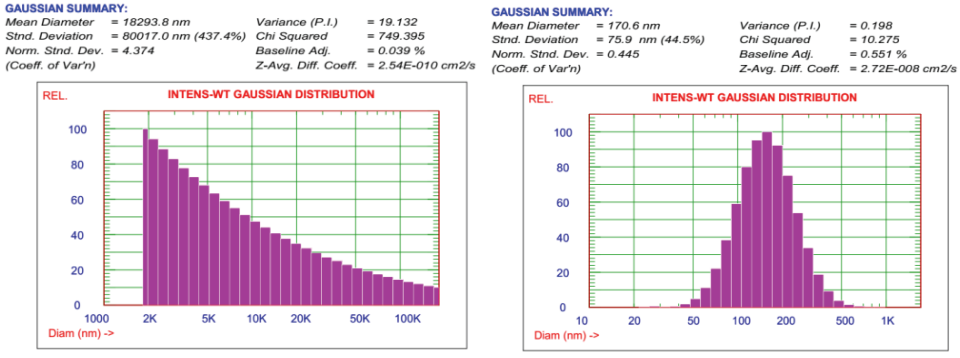
Рис. 2. Технологическая схема установки РИА-150:
1 – РИА; *2* – электродвигатель РИА; *3*, *6* – частотные преобразователи; *4* – шестеренный насос; *5* – электродвигатель насоса; *7* – емкость; *8* – патрубок залива жидкости; *9* – патрубок отбора проб и слива; *10* – термометр; *11* – манометр; *12* – счетчик жидкости; *13* – шаровой кран

При заданной угловой скорости вращения ротора РИА пробы эмульсии отбирали после 4, 8, 12, 16 и 20 проходов через РИА. Во избежание изменения размеров частиц эмульсии из-за коалесценции, пробы эмульсии анализировались не позже 1 часа после их отбора.

На рисунке 3 показаны гистограммы, полученные с прибора NICOMP-380ZLS для исходной грубодисперсной эмульсии и эмульсии после 20-кратного прохода через аппарат РИА-150 при частоте вращения ротора n = 70 об/с.

Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости среднего диаметра частиц эмульсии от количества циклов обработки при частоте вращения ротора n = 50 об/с представлены на рис. 4.

Для представления результатов анализа на приборе NICOMP-380ZLS в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 22412-2008 необходимо применять два значения: среднее значение диаметра (*англ.* Mean Diameter) и дисперсию (*P.I.*) для



а) *б*)

Рис. 3. Гистограммы распределения частиц эмульсии подсолнечного масла в воде до (*а*) и после обработки (*б*) в РИА

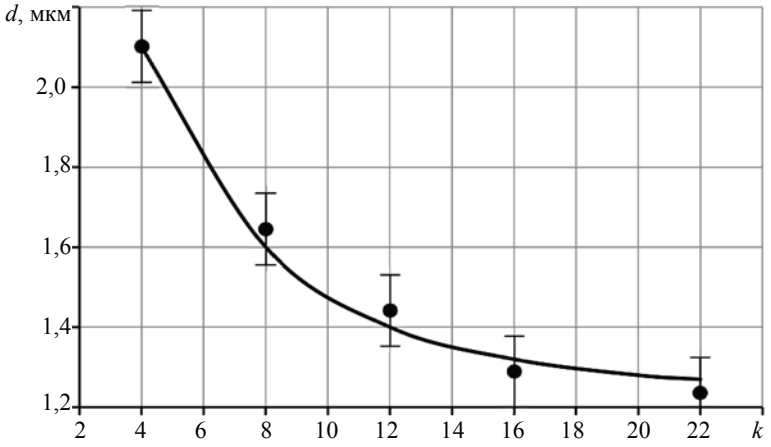


Рис. 4. Графики зависимости размера частиц эмульсии *d* от числа циклов обработки *k* в РИА

взвешенного по интенсивности Гауссова распределения (*англ*. Intensity Weighted Gaussian Distribution). Для практики в качестве характеристики распределения по размерам удобно использовать средний диаметр частиц и стандартное отклонение (*англ*. Standard Deviation), которые имеют одинаковые единицы измерения.

Средний диаметр частиц эмульсии подсолнечного масла в воде достигает предельно минимального значения при обработке в РИА-150 ориентировочно через 20 циклов при частоте вращения ротора 40 об/с и подаче насоса 6 л/мин (см. рис. 4). Дальнейшая обработка эмульсии не приводит к заметному уменьшению размера частиц эмульсии.

Обсуждение результатов и выводы

Удельная мощность, диссипируемая в обрабатываемой эмульсии, определяется потребляемой мощностью РИА N_1, затрачиваемой на вращение ротора, и потребляемой мощностью насоса N_2, затрачиваемой на подачу эмульсии в РИА за время обработки,

$$\varepsilon_1 = \frac{N}{m} = \frac{N_1 + N_2}{m}, \tag{13}$$

где ε_1 – удельная мощность, Вт/кг; N – общая потребляемая мощность, Вт; m – масса эмульсии в установке, кг; N_1 и N_2 – мощность, потребляемая соответственно РИА и насосом, Вт.

В качестве потребляемой мощности РИА и насоса примем мощности их электродвигателей. Мощности электродвигателей РИА и насоса рассчитываются по формуле

$$N_{1,2} = 1{,}73\, I_{1,2} U \cos\varphi_{1,2} \frac{K_{1,2}}{100}, \tag{14}$$

где $I_{1,2}$ – сила фазного тока в электродвигателях РИА и насоса, А; $U = 380$ В – напряжение сети; $\cos\varphi_1 = 0{,}88$; $K_1 = 87$ % – КПД электродвигателя РИА; $\cos\varphi_2 = 0{,}81$; $K_2 = 79$ % – КПД электродвигателя насоса.

При увеличении частоты вращения ротора увеличивается сила тока и потребляемая мощность РИА. Силу тока и частоту вращения роторов электродвига-

телей РИА и насоса определяли по показаниям частотных преобразователей в установке. Мощность, потребляемая насосом, практически не зависит от частоты вращения ротора РИА *n* (об/с). Примем, что удельная мощность, диссипируемая в обрабатываемой эмульсии, зависит от частоты вращения ротора и количества проходов через РИА, а также от мощности насоса. Графики зависимости потребляемой мощности РИА от частоты вращения ротора *n*, показаны на рис. 5.

Расчетный максимальный диаметр частиц эмульсии определяли по формуле (12). Для сравнения с расчетными значениями размера частиц рассматривали результаты анализа проб эмульсии после четырехкратного прохождения через РИА. Так как эмульсия четырехкратно проходила через РИА, в формуле (12)

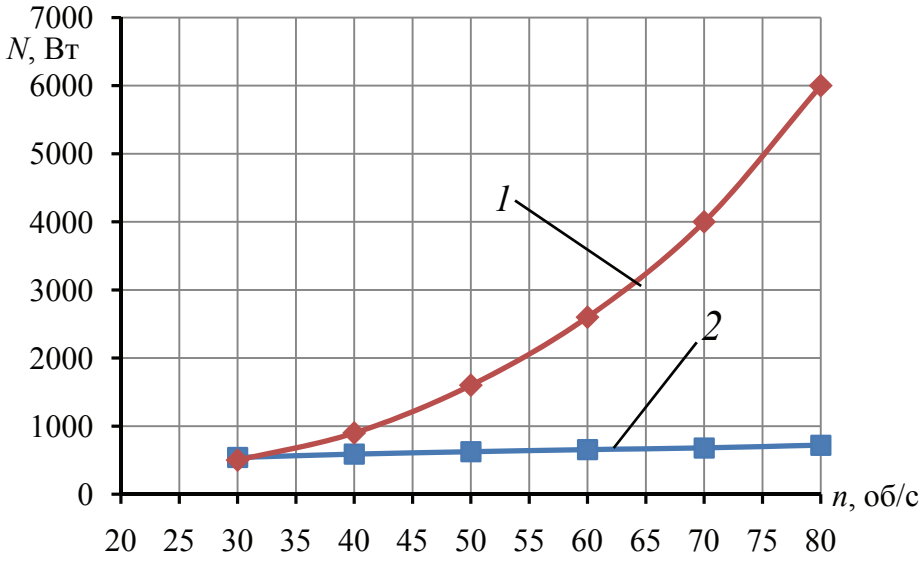


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности от частоты вращения ротора РИА:
1 – РИА-150; *2* – насос

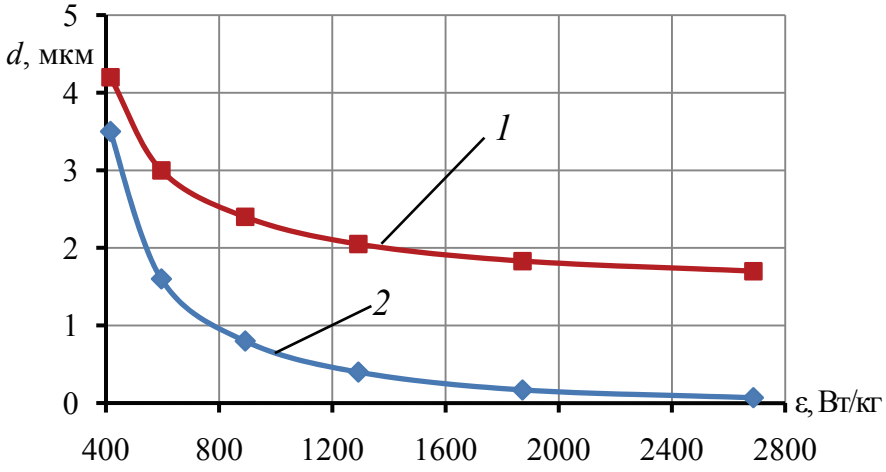


Рис. 6. Графики зависимости размера частиц эмульсии *d* от удельной мощности ε:
1 – расчетные данные для максимального диаметра частиц;
2 – экспериментальные значения среднего диаметра частиц

в расчете принимали значение удельной потребляемой мощности $\varepsilon_{max} = 4\varepsilon_1$, где ε_1 – удельная мощность при однократном прохождении эмульсии через РИА, Вт/кг. Для подсолнечного масла при температуре 20 °С динамическая вязкость $\mu = 0{,}056$ Па·с, плотность $\rho = 925$ кг/м^3. Плотность дистиллированной воды (дисперсионная среда) при температуре 20 °С $\rho = 1000$ кг/м^3. Принимаем для 10%-й эмульсии подсолнечного масла в воде плотность, определяемую по правилу аддитивности, $\rho = 993$ кг/м^3. Поверхностное натяжение для капель подсолнечного масла в воде $\sigma \approx 40$ мДж/м^2 [2].

Необходимо отметить, что по формуле (12) определялся максимальный диаметр частиц, а прибор NICOMP-380ZLS дает расчет среднего диаметра частиц. Как видно из графиков на рис. 6, характер изменения зависимости максимального расчетного диаметра частиц эмульсии d_{max} (график *1*) от величины диссипируемой мощности, идентичен зависимости среднего размера частиц эмульсии, измеренного по пробам эмульсии, обработанной в РИА (график *2*). Интенсивный турбулентный режим течения потоков обрабатываемой жидкости для РИА-150 лежит в диапазоне частоты вращения ротора 50…80 об/с (416…2688 Вт/кг). Для этого диапазона эмпирический коэффициент соотношения расчетного максимального диаметра устойчивой частицы эмульсии и среднего диаметра частиц 10%-й эмульсии подсолнечного масла в воде $C_1 \approx 0{,}2 \pm 0{,}1$.

Величина эмпирического коэффициента установлена для исследуемой эмульсии и конкретных условий ее обработки. Для точного расчета размера частиц по формуле (12) необходимо учесть всю энергию, которая может быть введена в обрабатываемую эмульсию, что не всегда возможно, так как часть энергии при работе РИА и насоса тратится на механические потери, нагрев жидкости, потери тепла и т.п.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные положения методики расчета размера капель эмульсии [4, 5], получаемой при интенсивной турбулентной обработке в РИА. Наибольший и средний размеры капель эмульсии зависят от суммарной диссипируемой мощности в жидкости. В локальном значении диссипируемой энергии следует иметь в виду и кавитационное воздействие, которое также определяется всей мощностью, затрачиваемой на обработку и прокачку эмульсии под давлением через РИА. С увеличением количества проходов эмульсии через активную зону обработки (в РИА) первоначальный размер капель значительно снижается. Тем не менее при увеличении количества проходов эмульсии через РИА тенденция на снижение размера капель замедляется и после определенной эмпирическим путем кратности обработки эмульсии в РИА дальнейшая ее обработка нецелесообразна по энергетическим затратам.

Параметры образцов эмульсии получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Получение и применение полифункциональных наноматериалов» (ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»).

Список литературы

1. Tadros, T. F. Emulsions: Formation, Stability, Industrial Applications / T. F. Tadros. – Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2016. – 299 p.

2. Зимон, А. Д. Коллоидная химия : учеб. для вузов / А. Д. Зимон. – 3-е изд., доп. и исправл. – М. : Агар, 2003. – 320 с.

3. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. Н. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.

4. Колмогоров, А. Н. О дроблении капель в турбулентном потоке / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 66, № 5. – С. 825 – 828.

5. Hinze, J.O. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes / J. O. Hinze // AIChE Journal. – 1955. – Vol. 1, No. 3. – P. 289 – 295. doi: 10.1002/AIC.690010303

6. Leng, D. E. Immiscible Liquid–Liquid Systems / D. E. Leng, R. V. Calabrese // In book: Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice / E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004. – Ch. 12. – P. 639-753.

7. Колмогоров, А. Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 32, № 1. – С. 19 – 21.

8. Обухов, А. М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока / А. М. Обухов // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. – 1941. – Т. 5, № 4-5. – С. 453 – 466.

9. Колмогоров, А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 30, № 4. – С. 299 – 303.

10. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2015. – 148 с.

Calculation of the Particle Diameter of Emulsion Prepared in a Rotary Pulse Apparatus

M. A. Promtov✉, V. G. Zheludkov, N. Ts. Gatapova, A. Yu. Stepanov

Department of Technological Processes, Apparatus and Technosphere Safety, promtov.ma@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: particle size; rotor-stator devise; specific power consumption; processing cycles; rotation frequency; emulsion.

Abstract: The paper considers a method for calculating the maximum diameter of emulsion particles based on the Hinze model, which describes the process of dispersion of emulsion droplets in a turbulent flow using Kolmogorov's theory of locally isotropic turbulence. The maximum size of stable droplets in an emulsion with a low concentration of the dispersed phase depends on its physical parameters and on the power consumption per unit mass of the emulsion. Experimental studies were conducted on the dispersion of sunflower oil in distilled water during processing in a rotor-stator devise (RSD) to obtain 10 % emulsion. Experimental dependences of the average diameter of emulsion particles on the rotor speed and the number of emulsion processing cycles in the RSD were obtained. It was found that for a RSD with a rotor speed of 50...80 rpm, the empirical coefficient of the ratio of the average diameter of particles of the studied emulsion and the calculated maximum diameter of a stable particle of the emulsion is 0.2 ± 0.1.

References

1. Tadros T.F. *Emulsions: Formation, Stability, Industrial Applications*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston. 2016, 299 p.

2. Zimon A.D. *Kolloidnaya khimiya: Uchebnik dlya vuzov* [Colloidal chemistry: Textbook for universities], Moscow: Agar, 2003, 320 p. (In Russ.)

3. Braginskii L.N., Begachev V.I., Barabash V.M., *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh. Fizicheskie osnovy i inzhenemye metody rascheta* [Mixing in Liquid Media: Physical Fundamentals and Engineering Computational Methods], Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (In Russ.)

4. Kolmogorov A.N. [About crushing droplets in a turbulent flow], *Doklady Akademii nauk SSSR* [USSR Academy of Sciences Reports], 1949, vol. 66, no. 5, pp. 825-828. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Hinze J.O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes, *AIChE Journal*, 1955, vol. 1, no 3, pp. 289-295. doi: 10.1002/AIC.690010303

6. Leng D.E., Calabrese R.V. Immiscible liquid–liquid systems, In book: Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M. *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice.* John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004. Ch. 12, P. 639-753.

7. Kolmogorov A.N. [Energy dissipation in locally isotropic turbulence], *Doklady Akademii nauk SSSR* [USSR Academy of Sciences Reports], 1941, vol. 32, no. 1, pp. 19-21. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Obukhov A.M. [On the distribution of energy in the spectrum of turbulent flow], *Izvestiya AN SSSR. Seriya geografiya i geofizika* [News of the USSR Academy of Sciences. Series Geography and Geophysics], 1941, vol. 5, no. 4-5, pp. 453-466. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Kolmogorov A.N. [The local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers], *Doklady Akademii nauk SSSR* [USSR Academy of Sciences Reports], 1941, vol. 30, no. 4, pp. 299-303. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods of calculating the characteristics of a rotor-stator devise], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2015, 148 p. (In Russ.)

Berechnung des Partikeldurchmessers der in einer Rotationspulsvorrichtung erhaltenen Emulsion

Zusammenfassung: Der Artikel betrachtet eine Methode zur Berechnung des maximalen Durchmessers von Emulsionspartikeln auf Grundlage des Hinze-Modells, das den Prozess der Dispersion von Emulsionströpfchen in einer turbulenten Strömung unter Verwendung von Kolmogorovs Theorie der lokal isotropen Turbulenz beschreibt. Die maximale Größe stabiler Tröpfchen in einer Emulsion mit einer geringen Konzentration der dispergierten Phase hängt von ihren physikalischen Parametern und vom Stromverbrauch pro Masseneinheit der Emulsion ab. Es sind experimentelle Untersuchungen zur Dispersion von Sonnenblumenöl in destilliertem Wasser während der Verarbeitung in einem Rotationsimpulsapparat (RIA) durchgeführt, um eine zehnprozentige Emulsion zu erhalten. Es sind experimentelle Abhängigkeiten des durchschnittlichen Durchmessers der Emulsionspartikel von der Rotorgeschwindigkeit und der Anzahl der Emulsionsverarbeitungszyklen in RIA ermittelt. Es ist festgestellt, dass bei RIA mit einer Rotorgeschwindigkeit von 50 bis 80 r/s der empirische Koeffizient des Verhältnisses des durchschnittlichen Durchmessers der Partikel der untersuchten Emulsion und des berechneten maximalen Durchmessers eines stabilen Emulsionspartikels 0,2 ± 0,1 beträgt.

Calcul du diamètre des particules de l'émulsion obtenue dans l'appareil à impulsions rotatives

Résumé: Est examinée la méthode de calcul du diamètre maximal des gouttes d'émulsion à la base du modèle de Hinze décrivant le processus de dispersion des gouttelettes d'émulsion dans un flux turbulent en utilisant la théorie de la turbulence localement isotrope de Kolmogorov. La taille maximale des gouttelettes stables dans une émulsion à faible concentration en phase dispersée dépend de ses paramètres physiques et de la puissance absorbée attribuée à l'unité de poids de l'émulsion. Sont menées des études expérimentales sur la dispersion de l'huile de tournesol dans de l'eau distillée dans un appareil à impulsions rotatives (AIR) afin d'obtenir une émulsion à 10%. Sont obtenues les dépendances expérimétriques du diamètre moyen des particules de l'émulsion sur la vitesse de rotation du rotor et le nombre de cycles de traitement de l'émulsion dans le AIR. Est établi que pour un AIR avec une vitesse de rotation du rotor de 50...80 tr/s, le coefficient empirique du rapport entre le diamètre moyen des particules de l'émulsion étudiée et le diamètre maximal calculé de la particule stable de l'émulsion est de 0,2 ± 0,1.

Авторы: ***Промтов Максим Александрович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; ***Желудков Владимир Геннадьеви***ч – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; ***Степанов Андрей Юрьевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 66.021.1: 66.063.8(075)
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.281-300

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЕМКОСТНОГО АППАРАТА В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ ЕГО ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ. Часть 1. РАЗРАБОТКА БЛОК-СХЕМЫ И ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕДАЧИ

Н. А. Меренцов[1]✉, Н. С. Соколов-Добрев[2], А. Б. Голованчиков[1], А. В. Персидский[3], М. В. Топилин[4]

Кафедры: «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» (1), steeple@mail.ru; «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» (2), ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия; АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады» (3), Волгоград, Россия; ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть» (4), Волгоград, Россия

Ключевые слова: виброустойчивость; динамическая модель; консольный вал; крутильные колебания; механические передачи; механическое перемешивание.

Аннотация: Емкостные аппараты с механическими перемешивающими устройствами для жидкофазных продуктов являются неотъемлемой частью технологических линий различных отраслей промышленности. В связи с тем, что большое количество факторов влияет на динамическую нагруженность механических систем (геометрические особенности механических мешалок, моменты сопротивления, конструкции приводов и их звеньев, реологические особенности перемешиваемых жидкофазных продуктов, точность сборки и монтажа), надежность такого рода технологического оборудования во многом определяется динамической устойчивостью его работы (виброустойчивостью). Представлен расчет виброустойчивости быстроходного консольного вала аппарата с механическим перемешиванием жидкофазных продуктов, подверженного крутильным колебаниям. Приведены основные положения, разработана структурная схема и динамическая модель привода механического перемешивающего устройства.

Введение

Механическое перемешивание жидкофазных продуктов при помощи быстроходных вращающихся мешалок широко используется в химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей, пищевой и смежных отраслях промышленности для получения растворов, суспензий, эмульсий, интенсификации тепло- и массообменных процессов, а также для увеличения скорости химических реакций [1 – 9]. Основным назначением механических смесителей является гомогенизация систем, стабилизация концентрационного и температурного фона по всему объему жидкости, заполняющей аппарат [10 – 17]. Особенно активно процессы тепло- и массообмена протекают в условиях турбулентной диффузии в потоке перемешиваемой жидкости. Одним из основных способов создания турбулентных потоков жидкофазных продуктов в аппаратах является применение быстроходных

вращающихся мешалок различных конфигураций [18, 19]. В промышленности, а также в лабораторном оборудовании применяются и продолжают разрабатываться новые модифицированные механические смесители различных конфигураций [18], их выбор диктуется реологическими особенностями перемешиваемых продуктов, геометрией резервуаров (аппаратов, реакторов) и специализированным назначением для конкретных протекающих процессов и аппаратов (выпадающие осадки, расслоения эмульсий, суспензий и т.д.). Все указанные факторы, геометрические соотношения, разнообразие механических смесителей создают свои трудности в прогнозировании динамической устойчивости (виброустойчивости) многомассовых систем приводов механических перемешивающих устройств емкостных аппаратов. И наряду с применением специальных устройств для вибродемпфирования и базовых методик расчета виброрезонансных диапазонов валов механических перемешивающих устройств емкостных аппаратов, должны создаваться новые усовершенствованные методики расчета и прогнозирования вибронагруженности многомассовых динамических систем с учетом множества факторов, а также новые «инструменты» и методики текущей вибродиагностики машин и аппаратов на площадках промышленных предприятий.

Значительная часть повреждений в современных машинах и аппаратах химических, нефтехимических, нефтегазоперерабатывающих, пищевых производств происходит вследствие больших напряжений, возникающих в их узлах и деталях при колебаниях и вибрациях [20, 21]. Колебания возбуждаются периодическими или внезапно приложенными силами и моментами, действующими как самостоятельно, так и в сочетании с термическими, статическими и другими факторами. Под воздействием периодически изменяющихся сил или моментов каждый элемент динамической системы совершает вынужденные упругие колебания. Эти колебания становятся особенно сильными и опасными в зоне резонансов возмущающих сил или моментов с собственными частотами системы [22, 23]. Вероятность возникновения опасных резонансов возрастает с увеличением диапазона угловых скоростей вращения элементов системы. Резонансы и другие неустойчивые состояния в приводах машин и аппаратов различных отраслей промышленности являются причинами их поломок или разрушений [24 – 29].

Проведение детальных исследований в данной области позволяет анализировать вибронагруженность привода механического перемешивающего устройства емкостного аппарата (реактора, аппаратов с механическим перемешиванием жидкофазных продуктов при помощи быстроходных вращающихся мешалок) на различных эксплуатационных режимах, оценивать влияние применяемых механических смесителей на динамическую нагруженность привода мешалки, имитировать критические режимы вращения валов привода, выполнять поиск оптимальных упруго-инерционных и диссипативных параметров демпфирующих устройств для снижения нагруженности отдельных деталей и узлов привода механического перемешивающего устройства емкостного аппарата.

Разработка блок-схемы и динамической модели передачи

Емкостной аппарат с механическим перемешивающим устройством для гомогенизации жидкофазных продуктов представлен на рис. 1, привод с консольным валом изображен на рис. 2. Основными элементами рассматриваемой динамической системы являются: электродвигатель, солнечная шестерня, водило и сателлиты планетарного редуктора, верхняя и нижняя опоры редуктора, зубчатая муфта, верхняя и нижняя опоры вала (подшипники), фланцевое соединение, мешалка и корпус аппарата.

Для предварительной расчетной оценки динамических характеристик исследуемого привода в соответствии с имеющейся технической и конструкторской документацией, а также по результатам проведенных измерений геометрических размеров элементов привода (привода механического перемешивающего устройства с консольным валом), установленного на кафедре ПАХПП ВолгГТУ, проведено исследование динамической нагруженности узлов и деталей силовой передачи рассматриваемой системы. Методика исследования основана на научных трудах ряда авторов, методики которых приведены в работе [20] и адаптированы под специфику работы химических машин и аппаратов (реакторов и емкостных аппаратов с механическими перемешивающими устройствами для жидкофазных продуктов).

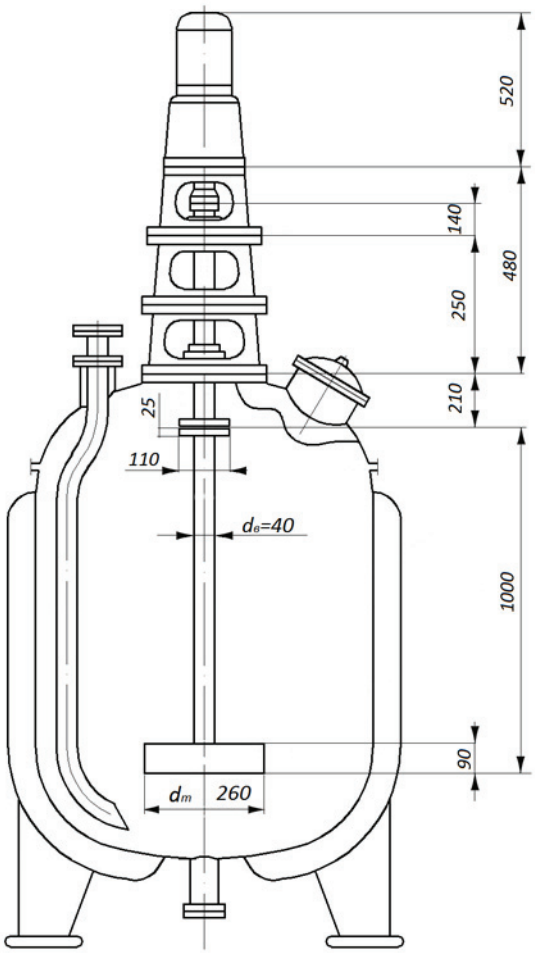


Рис. 1. Емкостной аппарат (реактор) с механическим перемешивающим устройством

На основании чертежей привода емкостного аппарата с механическим смесителем (см. рис. 1) на начальном этапе работы была сформирована предварительная структурная схема передачи (см. рис. 2). Как правило, наиболее удобным способом формирования динамической модели является ее разбиение на отдельные элементы – узлы [20], которые наглядно представляют звенья (компоненты) привода, через которые проходит силовой поток, по общей аналогии с многомассовой системой пролетного быстроходного вала [30 – 32]. Основой для разработки структурной схемы химических машин и аппаратов обычно служит кинематическая, гидравлическая или иная схема силовой цепи. Разрабатываемая на основе кинематической схемы привода структурная схема валопровода содержит основные узлы, участвующие в передаче силового потока от электродвигателя к перемешивающему устройству (рабочему органу, мешалке). На основании начальной структурной схемы создана динамическая расчетная схема или динамическая модель (рис. 3, *а*).

Полученная начальная расчетная схема отличается относительно высокой сложностью и включает в себя несколько кольцевых силовых контуров. При этом начальная модель имеет звенья с массами и упругими связями, моменты инерции и крутильные жесткости которых отличается от соседних на три порядка и более. Кроме того, расчет динамической системы существенно упрощается, если все сосредоточенные массы размещены на одном валу.

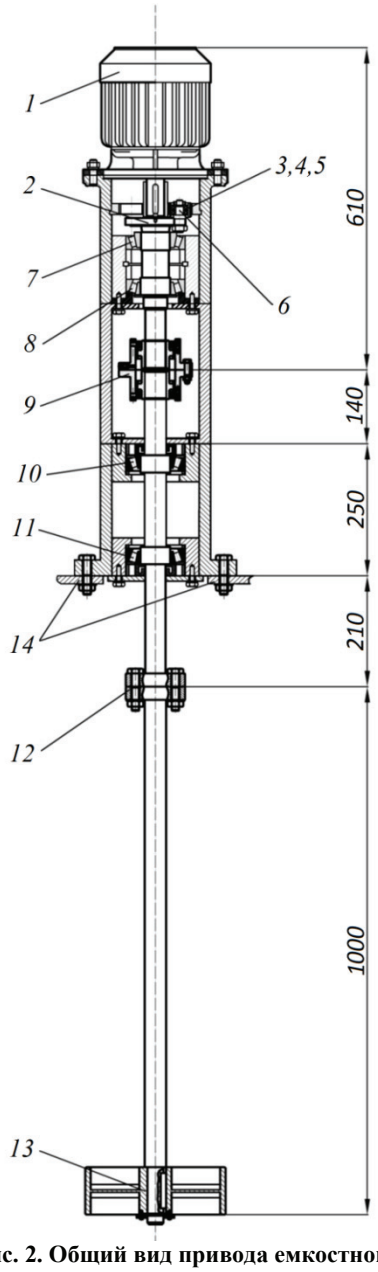


Рис. 2. Общий вид привода емкостного аппарата с механическим перемешивающим устройством (с быстроходным консольным валом):
1 – электродвигатель; *2* – солнечная шестерня планетарного редуктора; *3 – 5* – сателлиты планетарного редуктора; *6* – водило и вал планетарного редуктора; *7*, *8* – верхняя и нижняя опоры редуктора соответственно; *9* – зубчатая муфта; *10*, *11* – верхняя и нижняя опоры вала соответственно; *12* – фланцевое соединение (глухая муфта); *13* – мешалка; *14* – крышка корпуса аппарата

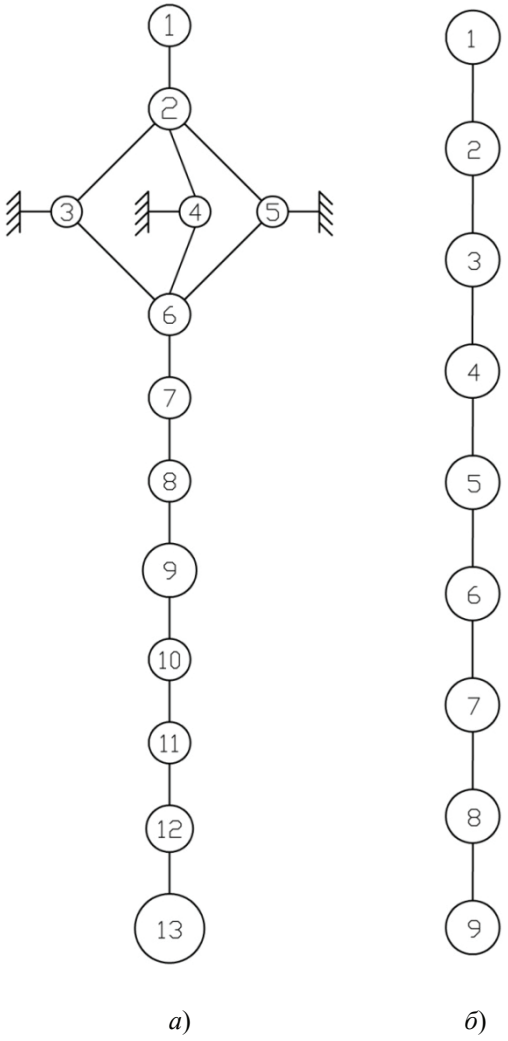


Рис. 3. Динамическая модель привода механического смесителя с консольным валом:
а – начальная модель;
б – приведенная редуцированная модель

Поэтому начальная динамическая модель была упрощена и ее моменты инерции и упругие связи приведены к одному валу (рис. 3, *б*).

Для определения моментов инерции сосредоточенных масс и жесткостей упругих связей из приведенных чертежей были выделены детали, которые разбивались на конечное число элементарных цилиндров и приводились к удобному для машинного расчета виду.

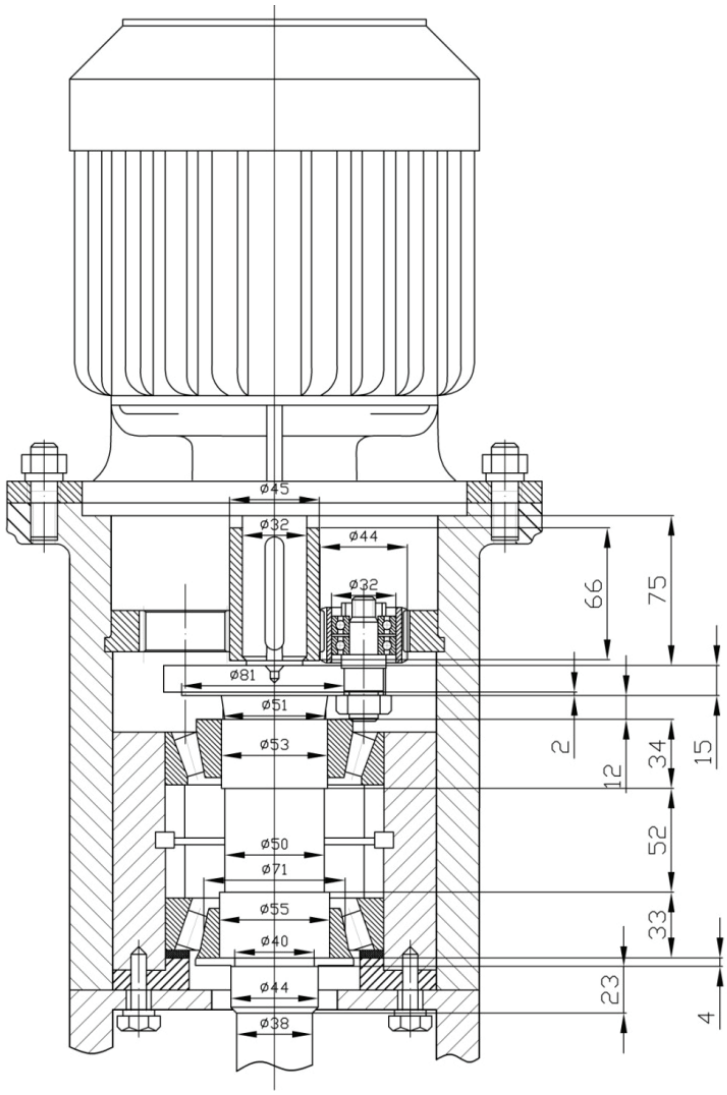


Рис. 4. Редуктор цилиндрический с вертикальным валом одноступенчатый планетарный

Основные размеры деталей планетарного редуктора представлены на рис. 4. Размеры и характеристики деталей привода приведены в табл. 1.

Для определения моментов инерций деталей и жесткостей участков использовались общеизвестные методики и рекомендации [20]. Ротор, щетки, подшипники и другие вращающиеся элементы электродвигателя объединены в одну инерционную массу.

Полученные значения моментов инерции масс модели также представлены в табл. 1; суммарные жесткости связей между элементами модели – в табл. 2.

Для упрощения расчетов созданную динамическую систему приводят к эквивалентной системе, сосредоточенные массы которой размещены на одном валу [20]. Приведение динамической модели подразумевает изменение упруго-инерционных параметров звеньев из условия равенства кинетической и потенциальной энергий эквивалентной и действительной систем.

Рассчитанные упруго-инерционные параметры начальной и приведенной динамических моделей передачи даны в табл. 3.

Таблица 1

Определение моментов инерции элементов динамической модели

Номер массы редуцированной модели	Номер детали начальной модели	Наименование детали	Номер элементарного цилиндра	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота цилиндра, мм	Момент инерции элементарного цилиндра	Суммарный момент инерции детали, кг·м^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	Электродвигатель	* Определяется по каталогу или экспериментально				0,01300	0,01336
		Вал электродвигателя		50	0	75	0,00036	
2	2	Солнечная шестерня	1	45	32	66	0,00015	0,01624
			2	50	45	21	0,00003	
	3	Сателлиты 3, 4, 5 при вращении относительно собственной оси	1	44	32	28	0,00006	
	4		1	44	32	28	0,00006	
	5		1	44	32	28	0.00006	
	3	Сателлиты 3, 4, 5 при вращении относительно общей оси (R = 45)	1	44	32	28	0,00032	
	4		1	44	32	28	0,00032	
	5		1	44	32	28	0,00032	
	6	Водило и вал планетарного редуктора во вращательном движении относительно собственной оси	1	111	0	15	1,744E-03	
			2	14	0	4	1,177E-07	
			3	28	0	10	4,707E-06	
			4	14	0	2	5,884E-08	
			5	20	0	11	1,348E-06	
			6	22	0	7	1,256E-06	
			7	14	0	19	5,589E-07	
			8	12	0	10	1,588E-07	
		Ось сателлита во вращательном движении относительно общей оси (R = 45)	11	111	0	15	0,01178	
			12	14	0	4	0,00005	
			13	28	0	10	0,00050	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			14	14	0	2	0,00002	
			15	20	0	11	0,00028	
			16	22	0	7	0,00022	
			17	14	0	19	0,00024	
			18	12	0	10	0,00009	
3	7	Верхняя половина 2 части вала редуктора, верхняя опора, верхняя половина 2 части редуктора	1	51	0	12	0,00006	0,00080
			2	53	0	34	0,00021	
			3	71	55	33	0,00041	
			4	50	0	26	0,00012	
4	8	Нижняя половина 2 части вала редуктора, нижняя опора редуктора, верхняя половина 3 части вала редуктора	1	50	0	26	0,00012	0,00093
			2	55	0	33	0,00023	
			3	71	55	33	0,00041	
			4	40	0	4	0,00001	
			5	44	0	23	0,00007	
			6	38	0	55	0,00009	
5	9	Нижняя половина 3 части вала редуктора, зубчатая муфта, верхняя половина 1 части основного вала	1	38	0	55	0,00009	0,01021
			2	51	38	53	0,00019	
			3	73	51	11	0,00018	
			4	92	73	58	0,00192	
			5	136	92	13	0,00269	
			6	136	92	13	0,00269	
			7	92	73	58	0,00192	
			8	73	51	11	0,00018	
			9	51	38	53	0,00019	
			10	40	0	79	0,00015	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	10	Нижняя половина 1 части основного вала, верхняя опора, верхняя половина 2 части основного вала	1	40	0	79	0,00015	0,00085
			2	55	0	33	0,00023	
			3	71	55	26	0,00032	
			4	40	0	70,5	0,00014	
7	11	Нижняя половина 2 части основного вала, нижняя опора, верхняя половина 3 части основного вал	1	40	0	70,5	0,00014	0,00086
			2	55	0	33	0,00023	
			3	71	55	26	0,00032	
			4	38	0	103,5	0,00017	
8	12	Нижняя половина 3 части основного вала, муфта, верхняя половина вала мешалки	1	38	0	103,5	0,00017	0,00847
			2	110	0	50	0,00561	
			3	103	45	9	0,00075	
			4	103	45	13	0,00108	
			5	40	0	442,5	0,00087	
9	13	Нижняя половина вала мешалки, мешалка	1	40	0	442,5	0,00087	0,10071
			2	240	60	5	0,01265	
			3	60	0	90	0,00089	
			4	30	0	18,5	0,00001	
			5	260	240	90	0,08629	

Таблица 2

Определение жесткостей связей участков динамической модели

Номер участка приведенной укрупненной модели	Номер участка начальной модели	Вид упругого соединения	Параметры участков				Крутильная жесткость участка, Н·м/рад	Суммарная крутильная жесткость, Н·м/рад
1	2	3	4				5	6
1-2	Участок между выходным валом электродвигателя и солнечной шестерней редуктора		Средний диаметр шпоночного соединения, мм	Активная высота шпонки, мм	Число шпонок	Длина шпоночного соединения, мм		
	1-2	Шпонка	35	8	1	56	137200	137200
2-3	Зубчатые соединения в планетарном механизме		Средний диаметр зацепления, мм	Ширина зубчатого венца, мм	Угол зацепления, °	Коэффициент зацепления		6018
	2-3 2-4 2-5 3-К 4-К 5-К	Зубчатое зацепление	40	28	0	0,1167	36597	
	Фланцевое соединение сателлитов и водила		Диаметр окружности крепежа, мм	Диаметр оси или болта, мм	Число болтов или осей	Толщина фланца, мм		
	3-6 4-6 5-6	Фланцевое соединение	90	14	1	21	2027800	
	Выходной вал планетарного редуктора		Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Длина вала, мм			
	6-7	Вал	51	0	12		4704552,06	
	6-7		53		34		1936615,40	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4				5	6
3-4	7-8	Вал	50	0	52		1002987,44	699701
	7-8		55		33		2313958,89	
4-5	8-9		40		4		5340707,51	121209
	8-9		44		23		1359883,46	
	8-9		38		110		158183,26	
	Вал редуктора и зацепление в зубчатой муфте между ведущей полумуфтой		Средний диаметр шлицевого соединения, мм	Активная высота шлица, мм	Число шлицев	Длина шлицевого соединения, мм		
	8-9	Шлицевое соединение	38	2	27	51	994194	
5-6	Вал перед верхней опорой и зацепление в зубчатой муфте		Средний диаметр шлицевого соединения, мм	Активная высота шлица, мм	Число шлицев	Длина шлицевого соединения, мм		113199
	9-10	Шлицевое соединение	38	2	27	51	994194	
	Вал между зубчатой муфтой и первой мешалкой		Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Длина вала, мм			
	9-10	Вал	40	0	158		135208	
	9-10		55		33		2313959	
6-7	10-11		40		141		151509	142199
	10-11		55		33		2313959	
7-8	11-12		38		207			1221573

Окончание табл. 2

1	2	3	4				5	6
7-8	11-12	Вал	Средний диаметр шлицевого соединения, мм	Активная высота шлица, мм	Число шлицев	Длина шлицевого соединения, мм		1221573
		Шпонка	70	14	1	96	1646400	
	Фланцевое соединение		Диаметр окружности крепежа, мм	Диаметр оси или болта, мм	Число болтов или осей	Толщина фланца, мм		
	11-12	Фланцевое соединение	74	14	5	25	4734150	
8-9	Вал мешалки		Наружный диаметр, мм	Внутрен-ний диаметр, мм	Длина вала, мм			20807
	12-13	Вал	40	0	885		24139	
			Средний диаметр шпоночного соединения, мм	Активная высота шпонки, мм	Число шпонок	Длина шпоночного соединения, мм		
	12-13	Шпонка	30	10	1	67	150750	

Таблица 3

Приведенные моменты инерции и крутильные жесткости участков динамической модели к выходному валу электродвигателя

Номер массы	Передаточное число по массам	Истинное значение момента инерции	Приведенное значение момента инерции	Номер участка	Передаточное число по участкам	Истинное значение жесткости	Приведенное значение жесткости
1	1,00	0,01336	0,01336	1-2	1	137200	137200
2		0,01624	0,01624	2-3		6018	6018
3	3,77	0,00080	0,00006	3-4	3,77	699701	49230
4		0,00093	0,00007	4-5		121209	8528
5		0,01021	0,00072	5-6		113199	7965
6		0,00085	0,00006	6-7		142199	10005
7		0,00086	0,00006	7-8		1221573	85948
8		0,00847	0,00060	8-9		20807	1464
9		0,10071	0,00709	–	–	–	–

Таблица 4

Логарифмические декременты затухания колебаний и коэффициенты демпфирования масс динамической модели

Номер массы	Приведенное значение момента инерции, кг·м^2	Номер участка	Приведенное значение жесткости, Н·м/рад	λ	$\omega_п$, Гц	k, Нмс/рад
1	0,01336	1-2	137200	0,050	510,0	0,68
2	0,01624	2-3	6018	0,060	472,6	0,92
3	0,00006	3-4	49230	0,110	4986,3	0,06
4	0,00007	4-5	8528	0,110	4728,5	0,07
5	0,00072	5-6	7965	0,150	762,6	0,16
6	0,00006	6-7	10005	0,110	2758,8	0,04
7	0,00006	7-8	85948	0,110	6337,8	0,08
8	0,00060	8-9	1464	0,300	1927,5	0,69
9	0,00709	–	–	0,800	72,3	0,82

Для определения диссипативных параметров модели использованы данные, полученные другими исследователями в аналогичных динамических системах [21]. Оценку демпфирования удобнее давать по безразмерному параметру – логарифмическому декременту колебаний λ. Коэффициент демпфирования k и логарифмический декремент связаны соотношением

$$k = 2I\omega\lambda, \tag{1}$$

где I – момент инерции; ω – парциальная частота колебаний массы, для которой определяется k. Парциальные частоты $\omega_{пi}$ каждой инерционной массы модели рассчитывались по формуле

$$\omega_{\text{п}\,i} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_\Sigma}{I_i}}, \qquad (2)$$

где I_i – момент инерции i-й массы; C_Σ – суммарная жесткость участков, присоединенных к массе I_i. Логарифмические декременты λ для отдельных деталей привода аппарата определены экспериментально, исходя из амплитуд затухающих колебаний при импульсном воздействии на узлы исследуемой системы.

Экспериментальные значения логарифмических декрементов и рассчитанные значения коэффициентов демпфирования масс приведенной модели представлены в табл. 4. Коэффициент демпфирования мешалки зависит от геометрических параметров применяемого механического смесителя и реологических свойств перемешиваемых жидкофазных продуктов.

Заключение

На начальной стадии исследования нагруженности и прогнозирования динамической устойчивости многомассовых систем приводов механических перемешивающих устройств емкостных аппаратов (реакторов), на примере консольного вала, на основании чертежей и конструкторской документации построена начальная структурная схема объекта исследования. Определены моменты инерций деталей и жесткости связей участков. Для их определения использовались общеизвестные методики и рекомендации по общей аналогии с работами по расчетам однопролетных валов химических реакторов [30 – 32]. Детали и элементы привода, в соответствии с приведенной методикой, разделялись на элементарные цилиндры и отдельные связи. Для упрощения последующих расчетов созданная динамическая система была приведена к эквивалентной.

На основании экспериментальных данных и расчетных методик аналогичных систем определены диссипативные параметры модели, получены логарифмические декременты колебаний и обобщенные коэффициенты демпфирования масс.

Разработанная модель и полученные динамические параметры системы позволяют на этапе проектирования и доводки конструкции рассчитывать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики системы, анализировать формы и частоты колебаний многомассовой системы, что даст возможность прогнозировать нагруженность привода механического перемешивающего устройства жидкофазных продуктов емкостных аппаратов (реакторов) на различных эксплуатационных режимах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00496, https://rscf.ru/project/25-29-00496/, «Моделирование тепло- и массообменных процессов в экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании с учетом структуры потоков».

Список литературы

1. Производительность осевых мешалок в смесителях с отражательными перегородками / И. В. Доманский, А. И. Мильченко, В. А. Некрасов, Н. В. Воробьев-Десятовский // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 97 – 104.

2. Клинов, А. В. Гидродинамические характеристики аппаратов с двухъярусными открытыми турбинными мешалками / А. В. Клинов, А. Г. Мухаметзянова, Л. Р. Минибаева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 12. – С. 12 – 15.

3. Карпушкин, С. В. Расчет механических перемешивающих устройств с применением системы конечно-элементного анализа / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. В. Стрижков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 758 – 764.

4. Кондракова, Е. Ю. Реактор для определения константы каталитической активности производных фталоцианина кобальта / Е. Ю. Кондракова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 373 – 377.

5. Мартьянов, Е. И. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем / Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.– 2021. – Т. 27, № 3. – С. 336 – 344.

6. Карпушкин, С. В. Система выбора конструкции механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, Н. Н. Афанасьева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2005. – Т. 11, № 2. –С. 423 – 431.

7. Выбор оптимальных параметров механического перемешивающего устройства при ламинарном перемешивании / С. В. Карпушкин, Н. А. Сержантова, В. В. Истомин, И. А. Посысаев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 488 – 492.

8. Карпушкин, С. В. Оптимизация параметров механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, Е. И. Мартьянов // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 6. – С. 41 – 48.

9. Кондракова, Е. Ю. Совмещенный процесс получения фталоцианина кобальта из производных *о*-фталевой кислоты и ее ангидрида / Е. Ю. Кондракова, А. Б. Килимник, Ю. М. Рапопорт // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 4-1. – С. 1018 – 1023.

10. Войтович, Р. Математическое моделирование гидродинамики смесителя с эксцентрически расположенной мешалкой / Р. Войтович, А. А. Липин, А. Г. Липин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 83 – 86.

11. Осевая сила, действующая на осевую мешалку в смесителе с перегородками / И. В. Доманский, А. И. Мильченко, Е. А. Максимова, С. А. Кубышкин, В. А. Некрасов // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 6. – С. 769 – 778.

12. Alekseev, K. A. Measurement of Velocity Fields in a Machine with a Two-Blade Mixer via Digital Tracer Visualization / K. A. Alekseev, A. G. Mukhametzyanova // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 56, No. 1. – P. 23 – 30.

13. Расчет полей скоростей и давления в аппарате с лопастной мешалкой / Р. Р. Дмитричева, В. В. Бронская, Г. В. Мануйко [и др.] // Вестн. технолог. ун-та. – 2016. – Т. 19, № 21. – С. 124 – 126.

14. Минибаева, Л. Р. Численное моделирование гидродинамической структуры потока в аппаратах с перемешивающими устройствами / Л. Р. Минибаева, А. Г. Мухаметзянова, А. В. Клинов // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2008. – № 6. – С. 191 – 198.

15. Минибаева, Л. Р. Модели турбулентности для адекватного описания поля скорости в аппаратах с перемешивающими устройствами / Л. Р. Минибаева, А. Г. Мухаметзянова, А. В. Клинов // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2010. – № 9. – С. 469 – 477.

16. Tarasova, L. A. Hydrodynamics of Eddy Flow in a Smooth-Wall Mixer-Equipped Vessel / L. A. Tarasova, S. V. Orlov, O. A. Troshkin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2007. – Vol. 43, No. 5-6. – P. 315 – 318. doi: 10.1007/s10556-007-0056-2

17. Klinov, A.V. Hydrodynamic characteristics of vessels with dual-tier open turbine mixers / A. V. Klinov, A. G. Mukhametzyanova, L. R. Minibaeva // Chemical and Petroleum Engineering. – 2012. – Vol. 47, No. 11-12. – P. 815 – 820. doi: 10.1007/s10556-012-9555-x

18. Карпушкин, С. В. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов : учеб. пособие / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 168 с.

19. Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств. Книга 2 / А. С. Тимонин, Г. В. Божко, В. Я. Борщев, Ю. И. Гусев ; под общ. ред. А. С. Тимонина. – М. : Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 476 с.

20. Меренцов, Н. А. Нестационарное вращение валов химических реакторов : учеб. пособие / Н. А. Меренцов, Н. С. Соколов-Добрев, П. В. Потапов. – Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2018. – 116 с.

21. Машины и аппараты химических производств / А. С. Тимонин, Б. Г. Болдин, В. Я. Борщев, Ю. И. Гусевидр. – Калуга : Ноосфера, 2014. – 856 с.

22. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Ноосфера, 2015. – Том. 2.

23. Остриков, А. Н. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств / А. Н. Остриков, В. Н. Василенко, В. В. Пойманов. – М. : Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 476 с.

24. Сташевская, О. В. Расчет пусковых осевых гидродинамических нагрузок на трехлопастные мешалки / О. В. Сташевская, В. В. Федотов // Фундаментальные основы механики. – 2021. – № 8. – С. 61 – 65. doi: 10.26160/2542-0127-2021-8-61-65

25. Сташевская, О. В. Расчет пусковых гидродинамических нагрузок на типовые быстроходные мешалки / О. В. Сташевская, В. В. Федотов // Фундаментальные основы механики. – 2022. – № 10. – С. 94 – 105. doi: 10.26160/2542-0127-2022-10-94-105

26. Сташевская, О. В. Расчет пусковых гидродинамических нагрузок на турбинные открытые мешалки и их прочностной расчет / О. В. Сташевская, Н. А. Марцулевич, В. В. Федотов // Фундаментальные основы механики. – 2020. – № 6. – С. 67 – 72. doi: 10.26160/2542-0127-2020-6-67-72

27. Сташевская, О. В. Расчет на прочность лопастных мешалок с учетом пусковых гидродинамических нагрузок / О. В. Сташевская, Н. А. Марцулевич, В. В. Федотов // Фундаментальные основы механики. – 2019. – № 4. – С. 204 – 209. doi: 10.26160/2542-0127-2019-4-204-209

28. Сташевская, О. В. Расчет на прочность трехлопастных мешалок с учетом пусковых гидродинамических нагрузок / О. В. Сташевская // Фундаментальные основы механики. – 2018. – № 3. – С. 131 – 135.

29. Сташевская, О. В. Расчет пусковых гидродинамических нагрузок на трехлопастные мешалки и их прочностной расчет / О. В. Сташевская, Н. А. Марцулевич, В. В. Федотов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2018. – № 46(72). – С. 93 – 96.

30. Merentsov, N. A. Calculation of Vibration Resistance of a Chemical Reactor High-Speed Shaft Undergoing Torsional Vibrations. Part I. Development of a Block Diagram and a Dynamic Transmission Model / N. A. Merentsov, N. S. Sokolov-Dobrev, A. V. Persidskiy // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). – Chelyabinsk, 2021. – Vol. I. – P. 759 – 767. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_88

31. Merentsov, N. A. Calculation of Vibration Resistance of Chemical Reactor High-Speed Shaft Undergoing Torsional Vibrations. Part II. Defining Model Elastic-Inertial Parameters / N. A. Merentsov, N. S. Sokolov-Dobrev, A. V. Persidskiy // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). – Chelyabinsk, 2021. – Vol. I. – P. 768 – 779. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_89

32. Merentsov, N. A. Calculation of Vibration Resistance of Chemical Reactor High-Speed Shaft Undergoing Torsional Vibrations. Part III. Calculation of Multi-Mass System Vibrations / N. A. Merentsov, N. S. Sokolov-Dobrev, A. V. Persidskiy // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). – Chelyabinsk, 2021. – Vol. I. – P. 780 – 786. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_90

A Study of Dynamic Characteristics of the Drive of a Mechanical Mixing Device of a Capacitive Apparatus to Reduce its Vibration Loading. Part 1. Development of a Block Diagram and Dynamic Model of Transmission

N. A. Merentsov[1]✉, N. S. Sokolov-Dobrev[2], A. B. Golovanchikov[1], A. V. Persidskiy[3], M. V. Topilin[4]

Departments: Processes and Apparatus for Chemical and Food Production (1), steeple@mail.ru; Technical Operation and Repair of Vehicles (2), Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia; JSC Federal Research and Production Center Titan-Barrikady (3), Volgograd, Russia; OOO LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft (4), Volgograd, Russia

Keywords: vibration resistance; dynamic model; cantilever shaft; torsional vibrations; mechanical transmissions; mechanical mixing.

Abstract: Capacitive devices with mechanical mixing devices for liquid-phase products are an integral part of process lines in various industries. Since a large number of factors affect the dynamic loading of mechanical systems (geometric features of mechanical mixers, moments of resistance, designs of drives and their links, rheological features of mixed liquid-phase products, accuracy of assembly and installation), the reliability of such process equipment is largely determined by the dynamic stability of its operation (vibration resistance). The article presents a calculation of the vibration resistance of a high-speed cantilever shaft of a device with mechanical mixing of liquid-phase products subject to torsional vibrations. The main provisions are presented, a structural diagram and a dynamic model of the drive of a mechanical mixing device are developed.

References

1. Domansky I.V., Milchenko A.I., Nekrasov V.A., Vorobyov-Desyatovsky N.V. [Productivity of axial stirrers in mixers with baffles], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2020, vol. 54, no. 1, pp. 97-104. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Klinov A.V., Mukhametzyanova A.G., Minibaeva L.R. [Hydrodynamic characteristics of devices with two-tier open turbine stirrers], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Petroleum Engineering], 2011, no. 12, pp. 12-15. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Karpushkin S.V., Krasnyansky M.N., Strizhkov A.V. [Calculation of mechanical mixing devices using a finite element analysis system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 758-764. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Kondrakova E.Yu. [Reactor for Determination of Catalytic Activity Constant of Cobalt Phthalocyanine Derivatives], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 373-377. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Martyanov E.I., Karpushkin S.V., Alekseev V.V. [Problem-oriented system of management and optimization of the main parameters of technically complex systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 336-344. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Karpushkin S.V., Krasnyansky M.N., Afanasyeva N.N. [System for choosing the design of a mechanical mixer of a vertical capacitive apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University,* 2005, vol. 11, no. 2, pp. 423-431. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Karpushkin S.V., Sergezhantova N.A., Istomin V.V., Posysaev I.A. [Selection of optimal parameters of a mechanical mixing device during laminar mixing], *Transactions of the Tambov State Technical University,* 2011, vol. 17, no. 2, pp. 488-492. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Karpushkin S.V., Martyanov E.I. [Optimization of mechanical mixing devices'parameters invertical tank apparatuses], *Himicheskaya promyshlennost segodnya* [Chemical industry today], 2024, no. 6. pp. 41-48. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Kondrakova E.Yu., Kilimnik A.B., Rapoport Yu.M. [Combined process of obtaining cobalt phthalocyanine from derivatives of o-phthalic acid and its anhydride], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 4-1, pp. 1018-1023. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Voitovich R., Lipin A.A., Lipin A.G. [Mathematical modeling of the hydrodynamics of a mixer with an eccentric stirrer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya I khimicheskaya tekhnologiya* [Bulletin of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2015, vol. 58, no. 11, pp. 83-86. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Domansky I.V., Milchenko A.I., Maksimova E.A., Kubyshkin S.A., Nekrasov V.A. [Axial force acting on an axial mixer in a mixer with partitions], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2022, vol. 56, no. 6, pp. 769-778. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Alekseev K.A., Mukhametzyanova A.G. [Measurement of Velocity Fields in a Machine with a Two-Blade Mixer via Digital Tracer Visualization], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2022, vol. 56, no. 1, pp. 23-30. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Dmitricheva R.R., Bronskaya V.V., Manuiko G.V., Aminova G.A., Gimaltynov A.G., Halimbaev R.R. [Calculation of velocity and pressure fields in an apparatus with a paddle stirrer], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the University of Technology], 2016, vol. 19, no. 21, pp. 124-126. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Minibaeva L.R., Mukhametzyanova A.G., Klinov A.V. [Numerical modeling of hydrodynamic flow structure in devices with mixing devices], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2008, no. 6, pp. 191-198. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Minibaeva L.R., Mukhametzyanova A.G., Klinov A.V. [Models of turbulence to adequately describe the velocity field in devices with mixing devices], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2010, no. 9, pp. 469-477. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Tarasova L.A., Orlov S.V., Troshkin O.A. [Hydrodynamics of eddy flow in a smooth-wall mixer-equipped vessel], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Petroleum Engineering], 2007, vol. 43, no. 5-6, pp. 315-318. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Klinov A.V., Mukhametzyanova A.G., Minibaeva L.R. [Hydrodynamic characteristics of vessels with dual-tier open turbine mixers], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Petroleum Engineering], 2012, vol. 47, no. 11-12, pp. 815-820. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B. *Raschety i vybor mekhanicheskikh peremeshivayushchikh ustroystv vertikal'nykh yemkostnykh apparatov: ucheb. posobiye* [Calculations and selection of mechanical mixing devices of vertical capacitive apparatuses: textbook], Tambov: Izdatel'stvo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2009, 168 p. (In Russ.)

19. Timonin A.S. (Ed.), Bozhko G.V., Borshchev V.Ya., Gusev Yu.I. *Oborudovaniye neftegazopererabotki, khimicheskikh I neftekhimicheskikh proizvodstv* [Oil and gas processing equipment, chemical and petrochemical production facilities. Book 2], Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2019, 476 p. (In Russ.)

20. Merentsov N.A., Sokolov-Dobrev N.S., Potapov P.V. *Nestatsionarnoye vrashcheniye valov khimicheskikh reaktorov* [Non-stationary rotation of the shafts of chemical reactors: textbook], Volgograd: VolgaGTU, 2018, 116 p. (In Russ.)

21. Timonin A.S., Boldin B.G., Borshchev V.Ya., Gusev Yu.I. [et al.]. *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv* [Machines and apparatuses of chemical production], Kaluga: Noosphere, 2014, 856 p. (In Russ.)

22. Timonin A.S. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimiko-tekhnologicheskogo i prirodookhrannogo oborudovaniya* [Basics of design and calculation of chemical-technological and environmental protection equipment: reference book. Vol. 2], Kaluga: Noosphere, 2015, 1086 p. (In Russ.)

23. Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Poymanov V.V. *Raschet I konstruirovaniye mashin i apparatov pishchevykh proizvodstv* [Calculation and design of machines and apparatus for food production], Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2023, 476 p. (In Russ.)

24. Stashevskaya O.V., Fedotov V.V. [Calculation of starting axial hydrodynamic loads on three-blade stirrers], *Fundamental'nyye osnovy mekhaniki* [Fundamental foundations of mechanics], 2021, no. 8, pp. 61-65. (In Russ.)

25. Stashevskaya O.V., Fedotov V.V. [Calculation of starting hydrodynamic loads on typical high-speed stirrers], *Fundamental'nyye osnovy mekhaniki* [Fundamental Foundations of Mechanics], 2022, no. 10, pp. 94-105. (In Russ.)

26. Stashevskaya O.V., Martsulevich N.A., Fedotov V.V. [Calculation of starting hydrodynamic loads on turbine open stirrers and their strength calculation] *Fundamental'nyye osnovy mekhaniki* [Fundamental Foundations of Mechanics], 2020, no. 6, pp. 67-72. (In Russ.)

27. Stashevskaya O.V., Martsulevich N.A., Fedotov V.V. [Calculation of the strength of blade stirrers taking into account starting hydrodynamic loads], *Fundamental'nyye osnovy mekhaniki* [Fundamental Foundations of Mechanics], 2019, no. 4, pp. 204-209. (In Russ., abstract in Eng.)

28. Stashevskaya O.V. [Strength calculation of three-blade stirrers taking into account starting hydrodynamic loads], *Fundamental'nyye osnovy mekhaniki* [Fundamental foundations of mechanics], 2018. no. 3. pp. 131-135. (In Russ., abstract in Eng.)

29. Stashevskaya O.V., Martsulevich N.A., Fedotov V.V. [Calculation of starting hydrodynamic loads on three-blade stirrers and their strength calculation], *Izvestia of the*

St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2018, no. 46(72), pp. 93-96. (In Russ., abstract in Eng.)

30. Merentsov N.A., Sokolov-Dobrev N.S., Persidskiy A.V. Calculation of Vibration Resistance of a Chemical Reactor High-Speed Shaft Undergoing Torsional Vibrations. Part I. Development of a Block Diagram and a Dynamic Transmission Model, *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering* (ICIE 2020), Chelyabinsk, 2021, vol. I, pp. 759-767. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_88

31. Merentsov N.A., Sokolov-Dobrev N.S., Persidskiy A.V. Calculation of Vibration Resistance of Chemical Reactor High-Speed Shaft Undergoing Torsional Vibrations. Part II. Defining Model Elastic-Inertial Parameters, *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering* (ICIE 2020), Chelyabinsk, 2021, vol. I, pp. 768-779. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_89

32. Merentsov N.A., Sokolov-Dobrev N.S., Persidskiy A.V. Calculation of Vibration Resistance of Chemical Reactor High-Speed Shaft Undergoing Torsional Vibrations. Part III. Calculation of Multi-Mass System Vibrations, *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering* (ICIE 2020, Chelyabinsk, 2021, vol. I, pp. 780-786. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_90

Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Antriebs der mechanischen Rührvorrichtung des kapazitiven Geräts, um die Vibrationsbelastung zu reduzieren. Teil 1. Entwicklung des Blockdiagramms und des dynamischen Modells der Übertragung

Zusammenfassung: Kapazitive Geräte mit mechanischen Mischvorrichtungen für flüssigphasige Produkte sind ein integraler Bestandteil technologischer Linien in verschiedenen Branchen. Da die dynamische Belastung mechanischer Systeme von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird (geometrische Merkmale mechanischer Mischer, Widerstandsmomente, Konstruktion der Antriebe und ihrer Verbindungen, rheologische Merkmale gemischter Flüssigphasenprodukte, Genauigkeit bei Montage und Installation), wird die Zuverlässigkeit dieser Art von Prozessausrüstung weitgehend durch die dynamische Stabilität ihres Betriebs (Vibrationsfestigkeit) bestimmt. Es ist die Berechnung der Vibrationsfestigkeit der Hochgeschwindigkeits-Auslegerwelle des Geräts mit mechanischer Mischung von Flüssigphasenprodukten vorgestellt, das Torsionsvibrationen ausgesetzt ist. Die wichtigsten Bestimmungen sind vorgestellt, es sind ein Strukturdiagramm und ein dynamisches Modell des Antriebs der mechanischen Mischvorrichtung entwickelt.

Étude des caractéristiques dynamiques de l'entraînement du dispositif d'agitation mécanique afin de réduire sa vibration. 1ère partie. Élaboration d'un organigramme et d'un modèle de transmission dynamique

Résumé: Les appareils de capacitifs avec agitateurs mécaniques pour produits en phase liquide font partie intégrante des lignes de traitement de diverses industries. En raison du fait qu'un grand nombre de facteurs affectent la charge dynamique des systèmes mécaniques (caractéristiques géométriques des agitateurs mécaniques,

moments de résistance, conception des actionneurs et de leurs liens, caractéristiques rhéologiques des produits en phase liquide agités, précision de montage et de montage), la fiabilité de ce type d'équipement technologique est largement déterminée par la stabilité dynamique de son fonctionnement (résistance aux vibrations). Est présenté le calcul de la résistance aux vibrations de l'arbre en porte-à-faux rapide de l'appareil avec agitation mécanique des produits en phase liquide soumis à des vibrations de torsion. Sont présentés les dispositions de base, le schéma structurel et le modèle dynamique de l'entraînement du dispositif de mélange mécanique.

Авторы: ***Меренцов Николай Анатольевич*** – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; ***Соколов-Добрев Николай Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей»; ***Голованчиков Александр Борисович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия; ***Персидский Александр Владимирович*** – ведущий инженер-конструктор, АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», Волгоград, Россия; ***Топилин Михаил Владимирович*** – ведущий инженер лаборатории стандартных исследований керна, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть», Волгоград, Россия.

УДК 661.717.3
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.301-310

СИНТЕЗ МОНОЭТАНОЛЭТИЛЕНДИАМИНА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Н. П. Козлова[1], Р. В. Дорохов[1]✉, Ю. А. Ферапонтов[1], И. В. Глебов[2]

АО «Росхимзащита» (1), ohinht@krhz.ru; Тамбов, Россия;
ПАО «РКК «Энергия» (2), Королёв, Россия

Ключевые слова: 2-(2-Аминоэтил)-аминоэтанол; ИК-спектрометрия; моноэтанолэтилендиамин; масс-спектрометрия; поглотитель диоксида углерода; синтез; хромато-масс-спектрометрия; этилендиамин; этиленхлоргидрин.

Аннотация: Представлены результаты разработки лабораторной технологии синтеза моноэтанолэтилендиамина (МЭЭДА) в щелочной среде из этилендиамина и этиленхлоргидрина отечественного производства. Методами физико-химического анализа проведена идентификация данного соединения. На основе полученных результатов рекомендованы технологические параметры синтеза МЭЭДА, позволяющие получать целевой продукт с содержанием основного вещества до 92 % весовых при минимальных затратах ресурсов. С использованием синтезированного МЭЭДА изготовлен поглотитель диоксида углерода ХАК-18-2М-Т (ТУ 6520-099-05907954–2001), применяемый в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических кораблей, в динамических условиях проведена оценка его хемосорбционных характеристик. Показано, что по основным эксплуатационным характеристикам полученный поглотитель CO_2 не уступает серийно выпускаемым образцам.

Введение

Во многих отраслях современной промышленности для глубокой очистки и осушки технологических потоков, улучшения качества сырья и конечных продуктов широко применяются адсорбционные методы с использованием адсорбентов, имеющих развитую внутреннюю поверхность – силикагели, цеолиты, алюмогели и другие, позволяющие практически полностью извлекать примеси из газовой или жидкой среды [1 – 5]. Широкое применение получили адсорбенты и хемосорбенты в системах жизнеобеспечения человека при его необходимости длительное время находиться в изолированных от внешней среды условиях (например, космические и глубоководные океанографические исследования), требующих поддержания строго фиксированного химического состава атмосферы [6 – 11]. Поглотитель диоксида углерода ХАК-18-2М-Т (ТУ 6520-099-05907954–2001) предназначен для поглощения CO_2 из газовоздушной смеси и в настоящее время используется в составе системы очистки атмосферы кабин пилотируемых космических кораблей.

Одним из основных компонентов, необходимых для изготовления ХАК-18-2М-Т, является 2-(2-Аминоэтил)-аминоэтанол (моноэтанолэтилендиамин), производимый фирмой Sigma Aldrich. В связи с санкциями, наложенными на Российскую Федерацию, закупка и поставка данного вещества из Германии практически невозможна. В России промышленный синтез моноэтанолэтилендиамина (**МЭЭДА**) отсутствует.

О синтезе аминоэтилэтаноламина стало известно еще в начале прошлого века из публикации [12], где дано описание получения аминоэтилэтаноламина реакцией оксида этилена с этилендиамином (**ЭДА**) при комнатной температуре в присутствии значительного количества воды. Реакцию проводили в избытке этилендиамина, чтобы избежать образования высших аддуктов, например, N,N'-бис-(2-гидроксиэтил) этилендиамина.

В описании к авторскому свидетельству [13] приведено получение N,N'-бис-(2-гидроксиэтил) этилендиамина этоксилированием этилендиамина оксидом этилена в молярном отношении 1 : 2 при температуре 40…50 °С и в приблизительно 20%-м водном растворе. Данная реакция генерирует большое количество побочных продуктов.

Также известен способ получения аминоэтилэтаноламина реакцией этоксилирования этилендиамина оксидом этилена в присутствии катализатора [14]. Процесс этоксилирования этилендиамина проводился непрерывно с использованием 0,05…0,5 моля оксида этилена, предпочтительно 0,1…0,3 моля на моль этилендиамина, введением потока продукта этоксилирования в дистилляционную установку, предназначенную для перегонки потока продукта аминирования моноэтаноламина аммиаком, и перегонкой потока продукта этоксилирования в дистилляционной установке с выделением аминоэтилэтаноламина.

Существует много трудностей, связанных с получением МЭЭДА. Так, одной из проблем является то, что этоксилирование этилендиамина приводит к образованию ряда нежелательных побочных продуктов, таких как ди-, три- или тетра(гидроксиэтил) этилендиамина, которые, наряду с непрореагировавшим этилендиамином и оксидом этилена, а также присутствующей водой, нужно отделить от аминоэтилэтаноламина.

Использование воды в качестве катализатора приводит к образованию высококипящего азеотропаэтилендиамина, который трудно разделить. Получаемую смесь продуктов обычно разделяют вакуумной перегонкой. Если используют катализаторы, которые полностью или частично растворяются в реагентах, их также следует удалять до обработки реакционной смеси. В реакциях при температуре выше 100 °С оксид этилена также реагирует с присутствующей водой, образуя этиленгликоль, что приводит к потерям оксида этилена и появлению дополнительных проблем разделения.

Цель работы – разработка технологии получения МЭЭДА из отечественных компонентов на производственной площадке АО «Росхимзащита» и его дальнейшее использование для получения поглотителя диоксида углерода ХАК-18-2М-Т (ТУ 6520-099-05907954–2001).

Экспериментальная часть

В качестве исходного отечественного сырья для получения МЭЭДА ($H_2N–CH_2–CH_2–NH–CH_2–CH_2–OH$) выбраны этилендиамин (ТУ 2636-160-44493179–2013), этиленхлоргидрин (**ЭХГ**) (ТУ 6-01-687–77), гидроксид калия (ГОСТ 24363–80) и спирт этиловый (ГОСТ 5962–2013). Предложенный процесс получения МЭЭДА состоит из следующих основных стадий:

1. Взаимодействие этилендиамина ($H_2NCH_2CH_2NH_2$) с ЭХГ ($HOCH_2–CH_2Cl$) в щелочной среде.
2. Отгонка смеси «этилендиамина – вода» и высаливание хлорида калия из продуктов реакции.
3. Фильтрация спиртового раствора МЭЭДА от хлорида калия.
4. Отгонка растворителя и целевого продукта.

Упрощенно химизм процесса может быть представлен следующим образом

$$H_2NCH_2CH_2NH_2 + HOCH_2–CH_2Cl + KOH \rightarrow$$

$$\rightarrow H_2N–CH_2–CH_2–NH–CH_2–CH_2–OH + KCl + H_2O, \quad (1)$$

Для реализации данного процесса в лабораторных условиях предложена технологическая схема, состоящая из двух установок, представленных на рис. 1 и 2.

Первый этап синтеза осуществляли следующим образом (см. рис. 1). В трехгорлую круглодонную колбу *3* объемом 500 мл, опущенную для охлаждения в емкость с холодной водой *7*, подают 188 мл 70%-го раствора ЭДА через открытую горловину и капельную воронку *1*, далее загружают 26 г КОН, надевают сверху обратный холодильник *5* с подключенной водой для охлаждения. После окончания загрузки раствора щелочи включается магнитная мешалка *6* и происходит перемешивание растворов. Для измерения температуры реакционной смеси используют термопару КТХК 02.01-063. Затем в колбе создается азотная подушка за счет подачи в течение 1–2 мин азота через насадку *8* для вытеснения воздуха. После прекращения подачи азота через капельную воронку *1* при непрерывном перемешивании в количестве 26 мл добавляется ЭХГ. При этом происходит экзотермическая реакция, и чтобы температура реакционной смеси не повышалась выше 52 °С, колбу *3* охлаждают проточной водой. Скорость подачи ЭХГ регулируется так, чтобы не наблюдалось выделения оксида этилена из реакционной массы. Выделение оксида этилена из круглодонной колбы *3* через силиконовую трубку *4* фиксируется по появлению пузырьков в склянке Дрекселя *2*. При выделении оксида этилена добавление ЭХГ прекращается до охлаждения реакционной смеси ниже критического значения. После завершения прикапывания ЭХГ в капельной воронке оставляют небольшое количество ЭХГ в качестве гидрозатвора. Реакционная смесь выдерживается 5 – 10 мин с перемешиванием для завершения процесса синтеза.

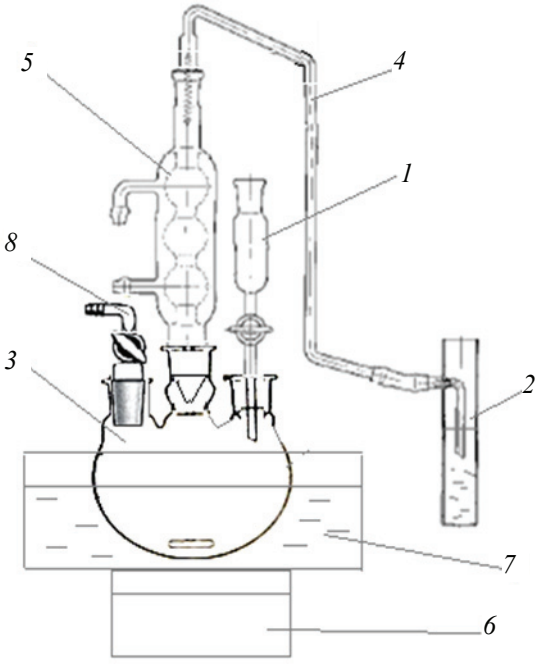


Рис. 1. Установка для синтеза МЭЭДА

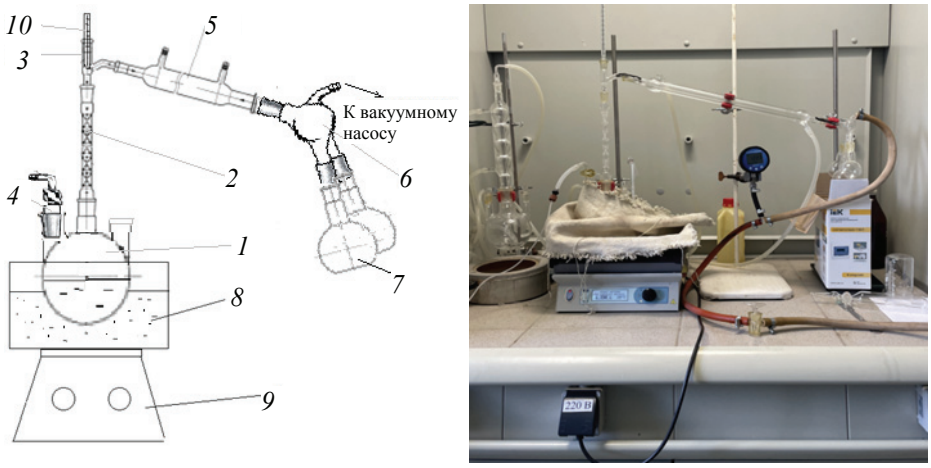


Рис. 2.Установка для отгонки смеси «ЭДА – вода», растворителя и МЭЭДА

Далее собирается установка, предназначенная для отгонки смеси «ЭДА – вода», а также для отгонки растворителя и целевого продукта МЭЭДА (см. рис. 2).

Для этого обратный холодильник *5* и капельная воронка *1* извлекаются из трехгорлой колбы *3* (см. рис. 1), свободные отверстия колбы закрывают плотно притертыми стеклянными пробками. Колбу *1* (см. рис. 2) располагают на песчаной бане *8* на электрической плитке с закрытой спиралью *9*, погружая колбу в песок до уровня реакционного раствора, и сверху накрывают асбестовым полотном. После сборки установки ее проверяют на герметичность. Если установка пригодна для работы, в нее помещают перегоняемое вещество, подключают вакуум и начинают постепенное повышение температуры в колбе *1*. Вакуумный насос (на схеме не указан) подсоединяется к перегонной установке через вакуумный кран к отводу аллонжа *6*.

При температуре в парах 80…110 °С (контролируется термометром *10*, соединенным дефлегматором *2* насадкой *3*) и при техническом вакууме 40…60 мм рт. ст. отгоняется (62 – 64)%-ный водный раствор ЭДА, конденсирующийся в холодильнике *5*. Перегонка смеси азеотропной «ЭДА – вода» заканчивается при снижении температуры над дефлегматором *2* ниже 80 °С. При этом в колбе *1* образуется вязкая смесь.

После отгонки ЭДА и воды содержимое колбы *1* охлаждается до 20…25 °С, вакуум отключается, в свободное горло колбы *1* вставляется капельная воронка и подается этиловый спирт в количестве 52 мл. При этом образовавшийся в процессе синтеза KCl выпадает в осадок, а продукты реакции растворяются в спирте. Содержимое колбы *1* фильтруется через фильтровальную бумагу – KCl остается на фильтре, а фильтрат – спиртовой раствор продуктов реакции в количестве 75 г загружается обратно в колбу *1* для проведения отгонки растворителя. Для этого смесь на песчаной бане подогревается до 80…85 °С и начинается отгонка этилового спирта. Отгонка этилового спирта (в количестве примерно 46 мл) заканчивается после того, как температура над дефлегматором *2* начинает снижаться ниже 78 °С. Этиловый спирт без дополнительной очистки используется в последующих синтезах. После отгонки этанола все соединения смазываются вакуумной смазкой, к установке подключается вакуумный насос и при 5…15 мм рт. ст. начинается отгонка целевого продукта – моноэтанолэтилендиамина. Отгонка проходит в слабом токе азота, который подключается краном, расположенным в насадке для подачи азота *4*. На первоначальной стадии начинается медленный отбор пред-

гона, состоящего из растворителя и непрореагировавших исходных веществ. Предгон отгоняется в одну из приемных колб *7*, затем при том же вакууме и температуре в парах 100…120 °С в другую приемную колбу *7* (меняется поворотом аллонжа *6*) отгоняется целевой продукт в количестве примерно 31,3 мл.

По представленной методике проведено несколько синтезов МЭЭДА и суммарно наработано около 110 мл МЭЭДА. Часть полученного продукта исследовалась методами физико-химического анализа, вторая часть использовалась для получения поглотителя диоксида углерода ХАК-18-2М-Т.

Анализ полученных веществ

При проведении первого этапа синтеза окончание процесса взаимодействия этилендиамина с этиленхлоргидрином оценивалось качественно методом хромато-масс-спектрометрии (**ХМС**) по содержанию (или отсутствию) ЭХГ в реакционной смеси на газовом хроматографе «Хроматэк Кристалл 5000.2» с масс-спектрометрическим детектором и капиллярной колонкой HP-FFAP в режиме программирования температуры 100…250 °С. Полученные хроматограммы обрабатывались с помощью программного обеспечения и библиотеки данных масс-спектров NIST 11.

Анализ реакционной смеси проводился примерно через 30 мин после добавления всего ЭХГ, для того чтобы удостовериться в его отсутствии в реакционной смеси и для прохождения реакции с полной конверсией основного реагента. На рисунке 3 представлена хроматограмма реакционной смеси, которая показывает наличие избытка этилендиамина и отсутствие ЭХГ.

Для определения времени выхода этиленхлоргидрина на хроматограмме снята масс-спектрограмма реактива ЭХГ (рис. 4).

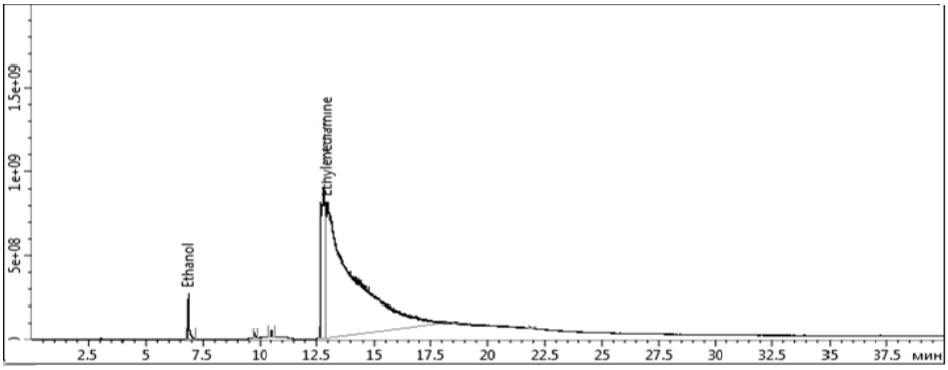


Рис. 3. Хроматограмма реакционной смеси после проведения синтеза

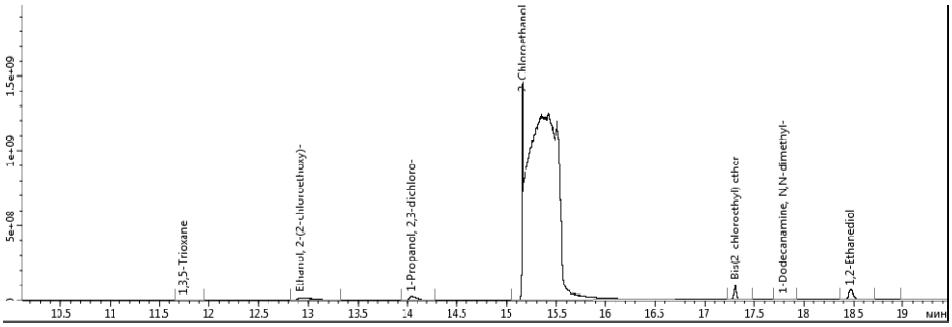


Рис. 4. Хроматограмма этиленхлоргидрина

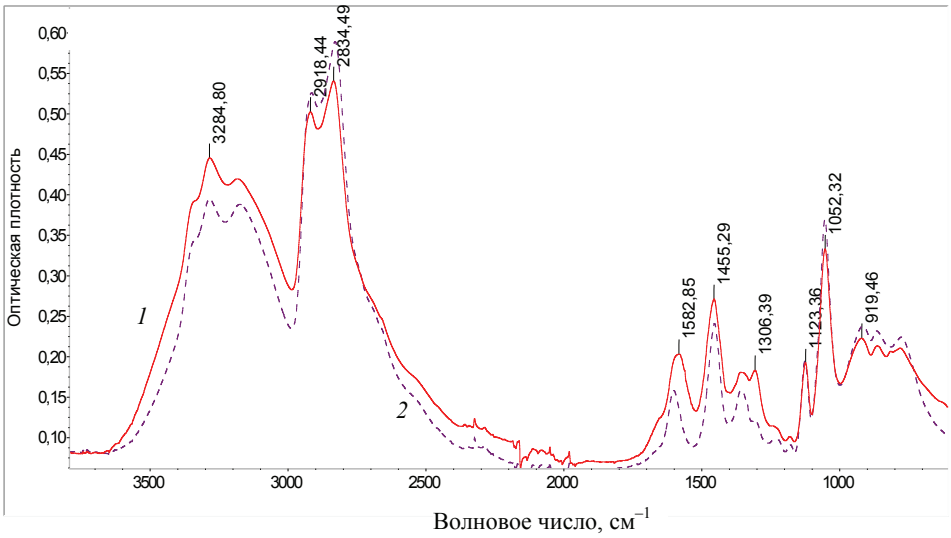


Рис. 5. ИК-спектрометрия образцов МЭЭДА:
1 – аналог производства Sigma Aldrich;
2 – производство АО «Росхимзащита»

Как видно, время выхода ЭХГ на хроматограмме соответствует времени 15,4 мин, что не наблюдается на хроматограмме реакционной смеси (см. рис. 3). Отсюда следует вывод, что реакция прошла полностью.

Качественное определение соответствия полученного продукта моноэтанолэтилендиамину проводили методом ИК-спектрометрии на ИК-Фурье спектрометре Nicoleti S50 FT-IR. Для съемок использовалась приставка нарушенного полного внутреннего отражения (**НПВО**). Условия проведения исследований:

- число сканов пробы 128;
- разрешение 4;
- диапазон 4000…400 см$^{-1}$;
- детектор DTGS НПВО;
- светоделитель KBr.

Полученные ИК-спектры интерпретировались с помощью библиотеки данных и образцов сравнения известных фирм. На рисунке 5 представлена ИК-спектрометрия образцов МЭЭДА в сравнении с аналогом производства Sigma Aldrich.

Из представленных результатов видно, что полученный продукт соответствует МЭЭДА. По данным химического анализа содержание основного вещества в продукте синтеза составляет ~ 92 %, плотность продукта соответствует справочным данным – 1,03 г/см^3.

Получение поглотителя диоксида углерода ХАК-18-2М-Т

Синтезированный МЭЭДА использован для изготовления опытного образца поглотителя диоксида углерода ХАК-18-2М-Т по стандартной методике. Проведены испытания изготовленного опытного образца поглотителя диоксида углерода ХАК-18-2М-Т на соответствие ТУ 6520-099-05907954–2001 по показателю динамической активности по диоксиду углерода, результаты которых представлены на рис. 6.

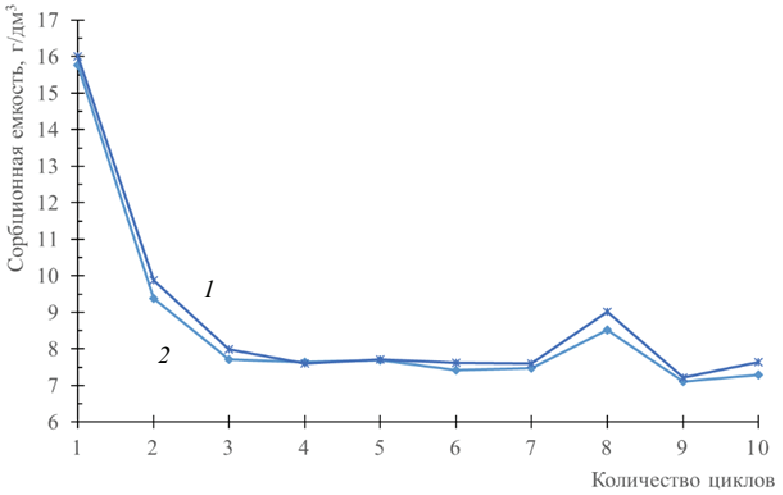


Рис. 6. Сравнение результатов испытаний образцов поглотителя ХАК-18-2М-Т:
1 – образец, изготовленный с использованием синтезированного образца МЭЭДА;
2 – серийный поглотитель ХАК-18-2М-Т

Заключение

Разработана лабораторная технология получения моноэтанолэтилендиамина (МЭЭДА) из отечественных компонентов и получено ~110 мл целевого продукта. Полученный продукт исследован методами хромато-масс-спектрометрии, масс-спектрометрии и ИК-спектрометрии. Показано, что содержание основного вещества в продукте синтеза составляет более 92 %, что по характеристикам соответствует зарубежным аналогам. С использованием синтезированного в АО «Росхимзащита» образца МЭЭДА изготовлен опытный образец поглотителя диоксида углерода ХАК-18-2М-Т и проведено его испытание на соответствие ТУ 6520-099-05907954–2001 по показателю динамической активности по диоксиду углерода. Установлено, что полученный поглотитель не уступает серийно выпускаемому образцу.

Список литературы

1. Лакеев, В. П. Осушка природного газа цеолитами / В. П. Лакеев, Ф. Г. Гайнауллин // Газовая промышленность. – 1968. – № 11. – С. 43 – 47.

2. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – М. : Химия, 1976. – 511 с.

3. Corma, A. Adsorption in Technology Hydrocarbon / A. Corma // Chemical Reviews. – 1997. – Vol. 97, No. 6. – P. 2373 – 2420.

4. Yang, R. T. Adsorbents: Fundamentals and Applications / R. T. Yang. – N.Y. : Wiley – Interscience, 2003. – 410 p.

5. Aristov, Yu. I. Novel Materials for Adsorptive Heat Pumping and Storage: Screening and Nanotailoring of Sorption Properties / Yu. I. Aristov // Journal of chemical engineering of Japan. – 2007. – Vol. 40, No. 13. – P. 1241 – 1251.

6. Иванов, Д. И. Системы жизнеобеспечения человека при высотных и космических полетах / Д. И. Иванов, А. И. Хромушкин. – М. : Машиностроение, 1968. – 251 с.

7. Presti, J. Undersea Technoology / J. Presti, H. Wallman, A. Petroctlli. – 1967. – Vol. 8. – P. 20.

8. Воронин, Г. И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей / Г. И. Воронин, А. И. Поливода. – М. : Машиностроение, 1967. – 236 с.

9. Petroctlli, A. Some Notes on the Use of Superoxides in Regenerative Air System / A. Petroctlli, A. Capolesto // Aerospace Medicine. – 1964. – Vol. 31. – P. 440 – 447.

10. Аврущенко, А. Е. Системы электрохимической регенерации воздуха атомных подводных лодок / А. Е. Аврущенко, А. Ф. Новиков, В. И. Френкель. – М. : Рус. история, 2002. – 430 с.

11. Пат. 2475301 Российская Федерация, МПК B01J 20/30. Способ получения гибких адсорбирующих изделий / Гладышев Н. Ф., Козадаев Л. Э., Путин Б. В., Путин С. Б., Ферапонтов Ю. А., Ферапонтова Л. Л., Булаев Н. А.; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – № 2011120012/05; заявл. 18.05.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. 5. – 9 с.

12. Knorr, L. Ueber Alkoholbasen aus Aethylendiamin und uber das Aethylenbismorpholin / L. Knorr, H. W. Brownadon // Chemische Berichte. – 1902. – Vol. 35, No. 3. – P. 4470 – 4473.

13. Описание изобретения к авт. свид. СССР 1512967 А1, СССР, МПК С 07 С 91/12. Способ получения N,N-бис(2-гидроксиэтил)-этилендиамина / Б. А. Палей, В. С. Бабынина, Л. Н. Сорокина, Б. С. Коломиец, Г. П. Палей; заявитель Тульский филиал Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института химической промышленности. – № 4399106, заявл. 10.02.1988; опубл. 07.10.1989.

14. Пат. 2159226 Российская Федерация, С2. МПК C07D 295/08, B01J 31/10, C07B 61/00, C07C 213/04, C07C 215/14, C07D 295/088. Способ получения аминоэтилэтаноламина и/или гидроксиэтилпиперазина / Юхан Келль (SE), Магнус Франк (SE); заявитель и патентообладатель Акцо Нобель Н. В. (NL). – № 9711481/04; заявл. 11.01.1996, опубл. 20.11.2000, Бюл. 32.

Synthesis of Monoethanolethylenediamine and Study of its Physicochemical Properties

N. P. Kozlova[1], R. V. Dorokhov[1]✉, Yu. A. Ferapontov[1], I. V. Glebov[2]

JSC Roskhimzashchita (1), hinht@krhz.ru; Tambov, Russia;
PJSC RSC Energia (2), Korolev, Russia

Keywords: 2-(2-Aminoethyl)-aminoethanol; IR spectrometry; monoethanolethylenediamine; mass spectrometry; carbon dioxide absorbent; synthesis; chromatograph mass spectrometry; ethylenediamine; ethylene chlorohydrin.

Abstract: The article presents the results of developing a laboratory technology for synthesizing monoethanolethylenediamine (MEEDA) in an alkaline medium from domestically produced ethylenediamine and ethylene chlorohydrin. The compound was identified using physicochemical analysis methods. The results made it possible to recommend technological parameters for synthesizing MEEDA that allow obtaining the target product with the content of the main substance up to 92% by weight with minimal resource costs. Using the synthesized monoethanolethylenediamine, an absorber of carbon dioxide KHAK-18-2M-T (TU 6520-099-05907954–2001) was manufactured for use in the life support systems of manned spacecraft, and its chemisorption characteristics were assessed under dynamic conditions. It was shown that the obtained CO_2 absorber is not inferior to commercially available samples in terms of its main performance characteristics.

References

1. Lakeyev V.P., Gaynaullin F.G. [Drying of natural gas with zeolites], *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 1968, no. 11, pp. 43-47. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology], Moscow: Khimiya, 1976, 511 p. (In Russ.)
3. Corma A. Adsorption in Technology Hydrocarbon, *Chemical Review*, 1997. vol. 97, no. 6, pp. 2373-2420.
4. Yang R.T. *Adsorbents: Fundamentals and Applications*, N.Y.: Wiley – Interscience, 2003, 410 p.
5. Aristov Yu.I. Novel Materials for Adsorptive Heat Pumping and Storage: Screening and Nanotailoring of Sorption Properties, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2007, vol. 40, no. 13, pp. 1241-1251.
6. Ivanov D.I., Khromushkin A.I. *Sistemy zhizneobespecheniya cheloveka pri vysotnykh i kosmicheskikh poletakh* [Human life support systems for high-altitude and space flights], Moscow: Mashinostroyeniye, 1968, 251 p. (In Russ.)
7. Presti J., Wallman H., Petroctlli A. *Undersea Technoology*, 1967, vol. 8, p. 20.
8. Voronin G.I., Polivoda A.I. *Zhizneobespecheniye ekipazhey kosmicheskikh korabley* [Life support of spacecraft crews], Moscow: Mashinostroyeniye, 1967, 236 p. (In Russ.)
9. Petroctlli A., Capolesto A. Some Notes on the Use of Superoxides in Regenerative Air System, *Aerospace Medicine*, 1964, vol. 31, pp. 440-447.
10. Avrushchenko A.Ye., Novikov A.F., Frenkel'V.I. *Sistemy elektrokhimicheskoy regeneratsii vozdukha atomnykh podvodnykh lodok* [Systems of electrochemical air regeneration of nuclear submarines], Moscow: Rus. Istoriya, 2002, 430 p. (In Russ.)
11. Gladyshev N.F., Kozadayev L.E., Putin B.V., Putin S.B., Ferapontov Yu.A., Ferapontova L.L., Bulayev N.A. *Sposob polucheniya gibkikh adsorbiruyushchikh izdeliy* [Method for producing flexible absorbent articles]; Russian Federation, 2013, Pat. 2475301 (In Russ.)
12. Knorr L., Brownadon H.W. Ueber Alkoholbasen aus Aethylendiamin und uber das Aethylenbis-morpholin, *Chemische Berichte*, 1902, vol. 35, no. 3, pp. 4470-4473.
13. Paley B.A., Babynina V.S., Sorokina L.N., Kolomiyets B.S., Paley G.P. *Sposob polucheniya N,N-bis(2-gidroksietil)-etilendiamina* [Method for producing N,N-bis(2-hydroxyethyl)-ethylenediamine], USSR, 1989, Author's Certificate 1512967 (In Russ.)
14. Yukhan Kell' (SE), Magnus Frank (SE), *Sposob polucheniya amino-etiletanolamina i/ili gidroksietilpiperazina* [Process for producing amino-ethylethanolamine and/or hydroxyethylpiperazine], Russian Federation, 1996, Pat. 2159226 (In Russ.).

Synthese von Monoethanolethylendiamin und Untersuchung seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Entwicklung einer Labortechnologie zur Synthese von Monoethanolethylendiamin (MEEDA) in alkalischem Medium aus im Inland produziertem Ethylendiamin und Ethylenchlorhydrin vorgestellt. Diese Verbindung war mithilfe physikalisch-chemischer Analysemethoden identifiziert. Die erzielten Ergebnisse ermöglichten es, technologische Parameter der MEEDA-Synthese zu empfehlen, die es erlauben, das Zielprodukt mit einem Gehalt an der Hauptsubstanz von bis zu 92 Gewichtsprozent bei minimalem Ressourcenverbrauch zu erhalten. Unter Verwendung von synthetisiertem

Monoethanolethylendiamin war ein Kohlendioxidabsorber KHAK-18-2M-T (TU 6520-099-05907954–2001) hergestellt, der in Lebenserhaltungssystemen bemannter Raumfahrzeuge verwendet wird. Seine Chemiesorptionseigenschaften sind unter dynamischen Bedingungen bewertet. Es hat sich gezeigt, dass der erhaltene CO_2-Absorber in Bezug auf seine wichtigsten Betriebseigenschaften den Serienmustern nicht unterlegen ist.

Synthèse de la monoéthanoléthylènediamine et étude de ses propriétés physico-chimiques

Résumé: Sont présentés les résultats du développement d'une technologie de laboratoire pour la synthèse de la monoéthanoléthylènediamine (MEEDA) dans un milieu alcalin à partir de l'éthylènediamine et du chlorure d'éthylène de production nationale. Les méthodes d'analyse physico-chimique ont permis d'identifier ce composé. Les résultats ont permis de recommander des paramètres technologiques pour la synthèse du MEEDA, ce qui permet d'obtenir un produit cible avec une teneur en matière organique allant jusqu'à 92% en poids, à un coût minimal des ressources. L'absorbeur de dioxyde de carbone HAC-18-2M-T (TU 6520-099-05907954-2001) a été fabriqué à l'aide de monoéthanoléthylènediamine synthétisée, utilisé dans les systèmes de soutien à la vie des vaisseaux spatiaux habités et ses propriétés chimiosorbantes ont été évaluées dans des conditions dynamiques. Il est montré que en termes de performance de base, l'absorbeur de CO_2 obtenu n'est pas inférieur aux échantillons produits en série.

Авторы: ***Козлова Надежда Петровна*** – кандидат технических наук, начальник лаборатории химико-аналитических исследований; ***Дорохов Роман Викторович*** – кандидат технических наук, начальник лаборатории № 2 отдела химии и новых химических технологий; ***Ферапонтов Юрий Анатольевич*** – кандидат химических наук, начальник отдела химии и новых химических технологий, АО «Росхимзащита», Тамбов, Россия; ***Глебов Игорь Васильевич*** – кандидат технических наук, заместитель руководителя научно-технического центра по российской орбитальной станции, ПАО «РКК «Энергия», Королёв, Россия.

УДК 664-4
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.311-320

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАЧИНОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ШОКОЛАДНЫХ КОНФЕТ

П. М. Смолихина✉, В. В. Апаршева, О. С. Харламова

Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», Pm_smolihina@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия

Ключевые слова: вязкость начинки; крахмал; пектин; реологические показатели; структурообразователи; формование шоколадных корпусов.

Аннотация: Приведены результаты экспериментальных исследований влияния различных концентраций крахмала и пектина на свойства начинок из пюре черной смородины для обоснования возможности их использования при производстве шоколадных конфет типа «Ассорти» с жидкими начинками. Проанализировано влияние температурных режимов на вязкость плодовых начинок в зависимости от вида и концентрации используемого структурообразователя. Установлены коэффициенты уравнения Оствальда-де-Виля при различных скоростях сдвига.

Введение

Направления совершенствования технологии производства конфет типа «Ассорти» – это расширение и улучшение органолептических показателей, модернизация способов формования шоколадных оболочек, разработка новых рецептур стабильных начинок. Кроме того, отмечается необходимость коррекции состава конфет в целях снижения калорийности, улучшения питательной ценности, повышения качества [1]. Несмотря на наличие линий и автоматов для получения шоколада с начинками, на многих кондитерских предприятиях конфеты «Ассорти» производят в основном ручным способом. В качестве начинок используют различные конфетные массы – твердые, полужидкие, густые и жидкие.

Жидкие начинки на основе плодово-ягодного пюре редко используются в производстве конфет «Ассорти», хотя они востребованы среди потребителей. Это связано с большим количеством брака и сложностью формирования донышек, устойчивых к вытеканию из них начинки. Использование в технологическом процессе производства стабилизаторов структуры (крахмала, ксантановой, рожковой, гуаровой и других видов камедей, карбоксиметилцеллюлозы и ее производных и т.д.) приводит к ухудшению сенсорных показателей готовых изделий и модификации консистенции начинки в процессе хранения: постепенное упрочнение плодово-ягодного пюре с постепенной потерей его текучести.

Цель работы – проектирование рецептуры плодово-ягодной начинки для конфет типа «Ассорти» на основе оценки реологических показателей в процессе формования изделий.

Обоснование выбора структурообразователей

Клеточные стенки плодов черной смородины богаты пектиновыми веществами. Однако рецептуры начинок, изготовленных на основе этих ягод, предусматривают внесение структурообразователя. Как отмечалось выше, консистенция плодово-ягодных пюре напрямую влияет на качество формования и потребительские свойства конфет: она не должна чрезмерно желироваться при хранении, превращаясь в студень, но в то же время не должна быть чрезмерно жидкой, чтобы не усложнять процесс формования изделий и не вытекать из шоколадных корпусов при хранении конфет.

Способность гидроколлоидов придавать системе определенную вязкость широко используется на практике, что особенно актуально для ягодных полуфабрикатов, которые содержат до 80 % воды [2].

Многие гидроколлоиды представляют собой углеводы, однако, по меньшей мере, один – желатин – это белок, относящийся к продуктам животного происхождения [2].

В настоящее время промышленность выпускает несколько типов пектинов с различной степенью этерефикации (**СЭ**): высокометоксилированный (СЭ 55 – 75 %, желирование происходит под действием высокой концентрации сахаров и кислот) и низкометоксилированный (СЭ 20 – 45 %, образует гели под действием сахаров и кислот, а также под действием многовалентных катионов, например, кальция). При внесении в реакционную среду аммиака происходит превращение С6-метильных эфирных групп в амидные, что приводит к образованию амидированного низкометоксилированного пектина со степенью амидирования (**СА**) 20 % и СЭ 30 %. Такие пектины желируют при низких концентрациях и требуют меньшего количества ионов кальция для гелеобразования. Кроме того, амидированный пектин менее склонен к образованию осадка при высоких концентрациях ионов кальция, что обеспечивает стабильность и улучшает текстуру продукта. Введение амидных групп в молекулу пектина положительно влияет на текстуру, механические свойства и стабильность гелей за счет уменьшения гидрофильности и формирования водородных связей [3].

Неамидированный и амидированный низкометоксилированные пектины взаимозаменяемы. Поскольку амидированный пектин дает более прочный гель, использование неамидированного для получения начинки для шоколадных конфет из плодов черной смородины является более предпочтительным.

Крахмалы представляют собой высокомолекулярные полимеры, свойства которых зависят от ботанического происхождения и формируются в процессе роста растений. Гранулы крахмала состоят из α-D-глюкопиранозных звеньев, полимеры глюкозы представлены амилозой и амилопектином. Входящие в состав крахмала мономеры соединены α-связями, α-связанные фрагменты усваиваются человеком [3]. На свойства готового продукта оказывает влияние несколько ключевых параметров: температура клейстеризации (достижение показателя сопровождается изменением вязкости, процесс желирования протекает по-разному для различных видов крахмалов), максимальная вязкость (достигается при нагревании) и вязкость, при которой нативный крахмал разрушается. Завершающей стадией процесса является гелеобразование и «садка» застывания. На этом этапе особенно заметны различия между высокоамилозными крахмалами (содержанием амилозы более 40 %) и восковыми крахмалами (содержанием амилозы менее 15 %). Высокоамилозные крахмалы более склонны к «садке» и желеобразованию по сравнению с низкоамилозными. Данный факт важно учитывать при разработке жидких систем.

Таким образом, для получения густой плодово-ягодной массы, пригодной для формования в шоколадные оболочки без последующего студнеобразования,

наиболее предпочтителен картофельный крахмал, для которого характерны низкая температура клейстеризации, образование вязких клейстеров при низкой концентрации и высокая степень деградации. Данный вид крахмала повсеместно распространен и доступен с экономической точки зрения.

Проводимые исследования направлены на изучение влияния пектина и картофельного крахмала не реологические свойства пюре из плодов черной смородины для получения конфет типа «Ассорти» с полужидкой начинкой.

Экспериментальная часть

В рамках обоснования выбора концентрации загустителя в целях достижения необходимой консистенции начинки для формования шоколадных корпусов конфет исследовали влияние концентрации пектина и крахмала на вязкость смородинового полуфабриката.

Пюре из плодов черной смородины представляет собой сложную систему, состоящую из природных многокомпонентных органических полимеров. Вязкие свойства такой системы, не подчиняющейся закону вязкости Ньютона, можно описать степенным уравнение Оствальда-де-Виля

$$\tau = K\dot{y}^{n},$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – коэффициент консистенции, зависящий от природы материала; $\dot{y}$ – скорость деформации, $с^{-1}$; n – индекс течения.

В рамках проведенных исследований установлены коэффициенты уравнения Оствальда-де-Виля (табл. 1), вязкость и напряжение при различных скоростях сдвига. Полученные кривые (рис. 1) эффективно описываются степенной функцией в широком диапазоне скоростей сдвига (коэффициент аппроксимации не менее 0,95).

Реологическая константа уравнения (индекс течения) отражает степень отклонения течения аномальных жидкостей от ньютоновских и применяется в расчетах процессов переработки полимеров.

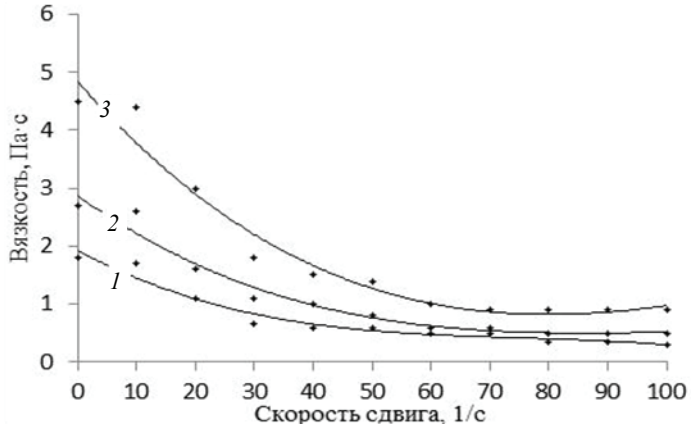
Для полимеров, обладающих высокоэластичными свойствами и вязкостью, индекс течения находится в пределах нескольких десятых и зависит от молекулярной массы, структуры цепей, а также от концентрации наполнителя и температуры [3].

Анализ представленных на рис. 1 данных позволяет отнести контрольный образец начинки из плодов черной смородины к псевдопластичным жидкостям ($n < 1$), поскольку вязкость образца снижается с ростом скорости сдвига. Снижение вязкости в результате ослабевания сопротивления между отдельными слоями массы связано с изменением структуры молекул начинки: частицы черной смородины и молекулы пектина, вращаясь под действием ротора, располагаются параллельно движению его поверхности [3, 4].

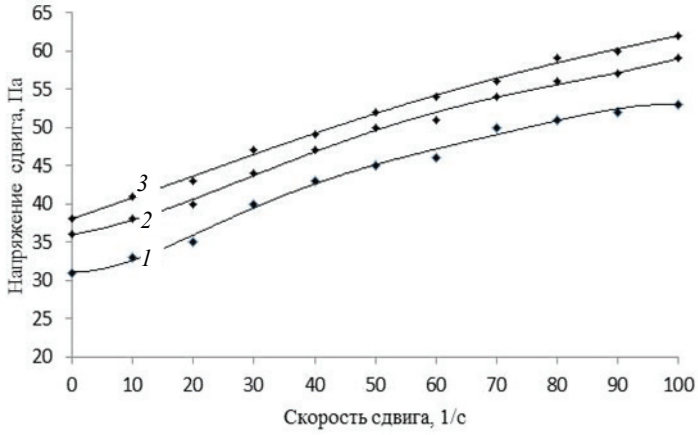
Таблица 1

Коэффициенты уравнения Оствальда-де-Виля для контрольного образца

Коэффициенты уравнения	Температура, °С		
	50 ± 2	25 ± 2	18 ± 2
K	24,60	23,54	22,91
n	0,1836	0,2006	0,2194
Достоверность аппроксимации	0,9563	0,9548	0,9571



а)



б)

Рис. 1. Кривые вязкости (*а*) и течения (*б*) для контрольного образца начинки при температуре,°С: *1* – 50; *2* – 25; *3* – 18

Высокомолекулярные углеводы, перешедшие в раствор при нагревании плодово-ягодного сырья, дифференцируются степенью полимеризации, этерификации и другими свойствами. Так, пектиновые вещества, полученные при температуре выше 80 °С, отличаются более высокой молекулярной массой и имеют высокую метоксильную составляющую, чем растворенные вещества при низких температурах, что объясняется гидролизом протопектина и превращением его в пектиновые вещества [3].

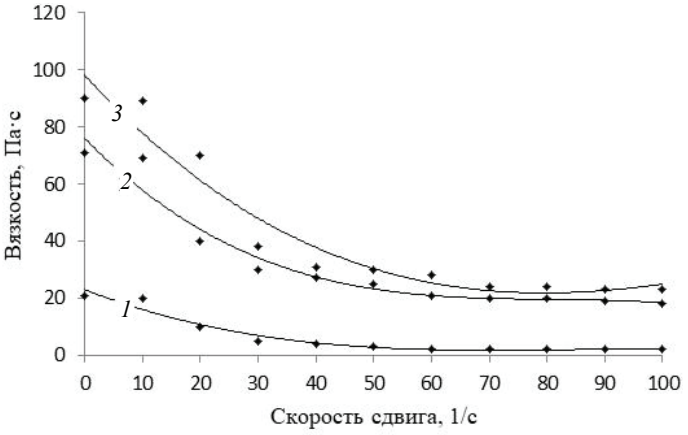
Пектиновые компоненты пюре из черной смородины находятся в состоянии ограниченного набухания и представляют собой двухкомпонентную систему: насыщенный водный раствор полисахарида и полимер, насыщенный водой. Повышение температуры на стадии уваривания начинки вызывает дисбаланс в системе [3]. Однако температурные режимы получения начинки не позволяют провести полный гидролиз пектиновых веществ, содержащихся в черной смородине. Кроме того, в ягодное пюре, согласно рецептуре, дополнительно вносится сахарный сироп, поэтому для получения требуемой консистенции смеси необходимо дополнительное внесение загустителя.

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что при внесении в начинку низкометоксилированного пектина, вязкость ягодной смеси значительно возрастает (табл. 2, рис. 2). Анализ полученных графических данных свидетельствует о четкой корреляции между вязкостью начинки и содер-

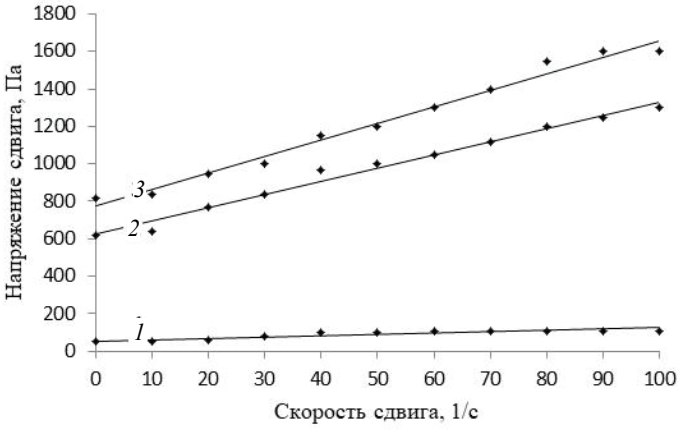
Таблица 2

Коэффициенты уравнения Оствальда-де-Виля для образцов с пектином

Коэффициенты уравнения	Температура, °С								
	50 ± 2			25 ± 2			18 ± 2		
	1 %	3 %	5 %	1 %	3 %	5 %	1 %	3 %	5 %
K	7,845	69,14	113,5	248,1	288,9	392,7	557,6	591,5	705,4
n	0,444	0,336	0,391	0,198	0,332	0,303	0,205	0,368	0,372
Достоверность аппроксимации	0,998	0,987	0,997	0,976	0,987	0,983	0,982	0,987	0,979



а)



б)

Рис. 2. Кривые вязкости (*а*) и течения (*б*) для экспериментальных образцов начинки с низкометоксилированным пектином при температуре формования 18 °С и концентрации, %: *1* – 1; *2* – 3; *3* –5

жанием пектина: во всех экспериментальных образцах прирост концентрации пектина на 1 % приводил к повышению вязкости в диапазоне 10…15 Па·с. Важно отметить, что при различных температурах образцов характер зависимостей оставался практически неизменным. Параллельно установлено, что увеличение доли пектина на 1 % приводило к росту напряжения сдвига в среднем на 50…70 Па.

Вязкость начинок снижается по экспоненте при увеличении скорости деформации до 40…50 $с^{-1}$, после чего изменяется линейно. При больших скоростях деформации (после 60 $с^{-1}$) вязкость изменяется незначительно, что свидетельствует о частичном обратимом разрушении структуры [5 – 7].

Зависимость напряжения сдвига имеет обратный характер: с ростом скорости деформации значение напряжения сдвига увеличивается. Причем при скорости деформации до 30 об/мин изменения незначительны, а при дальнейшем увеличении скорости происходит резкий рост, который несколько замедляется по мере приближения значения скорости к 50 об/мин.

Анализируя коэффициенты уравнения, можно заметить, что коэффициент консистенции *K* наиболее чувствителен к изменению концентрации пектина в образцах и достигает максимального своего значения при содержании пектина в образце в количестве 5 %. При уменьшении температуры коэффициент консистенции значительно увеличивается, причем наибольшее изменение значения коэффициента (в 32 раза) наблюдается при наименьшей концентрации пектина 0,5 %.

Индекс течения для образцов с пектином имеет прямую зависимость от температуры пробы: чем выше температура, тем выше индекс течения для образца с конкретной концентрацией пектина. При высокой температуре с увеличением концентрации индекс течения уменьшается, при низкой температуре с увеличением концентрации пектина – возрастает. Это объясняется тем, что при остывании начинается процесс гелеобразования, то есть происходит формирование пространственной структуры пектинового каркаса [5 – 7].

При приближении температуры начинки к температуре формования вязкость достигает максимальных значений, при концентрации 3 – 5 % начинается процесс студнеобразования массы. При концентрации 0,5 – 1 % – консистенция гелеобразная, что позволяет эффективно сформировать донышки шоколадных корпусов, однако по истечении 2 – 4 суток хранения начинка превращается в мягкий студень.

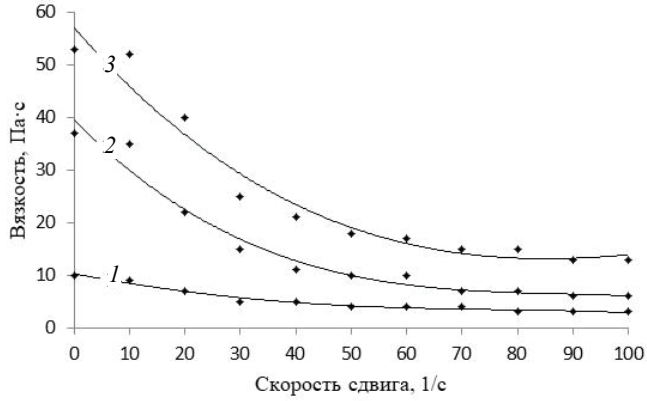
Сухие вещества крахмала, представленные нерастворимыми волокнами и зернами, оказывают влияние на формирование необходимой структуры и повышают вязкость начинок. Кроме того, внесение данного растительного полисахарида в рецептуру пюре из плодово-ягодного сырья оказывает влияние на такие параметры конечного продукта, как выход, вкус, сроки хранения и др. [5 – 7].

Крахмал хорошо набухает в водной среде при температуре 50 °С, а при 65 °С начинает клейстеризоваться, что удобно для получения жидких начинок. Кривые течения пюре из плодов черной смородины с добавлением крахмала представлены на рис. 3, коэффициенты уравнения – в табл. 3.

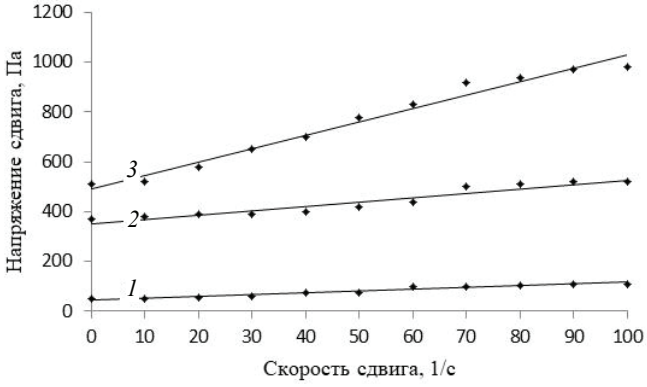
Реологические исследования выявили закономерности изменения вязкости экспериментальных образцов от скорости деформации: в начальном диапазоне скоростей деформации (в интервале 10…30 $с^{-1}$) наблюдалось экспоненциальное резкое снижение вязкости начинок; при дальнейшем увеличение скорости сдвига (в интервале 30…100 $с^{-1}$) показатель вязкости снижался постепенно, достигая стабильных минимальных значений.

Полученные экспериментальные данные (см. рис. 3) свидетельствуют о выраженной зависимости реологических свойств начинки от концентрации крахмала. Установлено, что прирост содержания крахмала на 2 % во всех экспериментальных образцах приводил к увеличению вязкости в среднем на 15 Па·с. При этом температура исследуемых образцов не оказывала существенного влияния на характер выявленных зависимостей.

При достижении температуры 60 °С , являющейся точкой клейстеризации, наблюдалась максимальная вязкость начинки. В этом состоянии крахмальные гранулы интенсивно гидратируют и увеличиваются до максимального размера [8]. В связи с отсутствием дальнейшего нагрева, достигнутые размеры гранул крахмала сохраняются в течение всего срока хранения продукта.



а)



б)

Рис. 3. Кривые вязкости (*а*) и течения (*б*) для образцов начинки с крахмалом при температуре формования 18 °С и концентрации, %:
1 – 1; *2* – 3; *3* – 5

Таблица 3

Коэффициенты уравнения Оствальда-де-Виля для образцов с крахмалом

Коэффициенты уравнения	Температура, °С								
	60 ± 2			25 ± 2			18 ± 2		
	1 %	3 %	5 %	1 %	3 %	5 %	1 %	3 %	5 %
K	23,32	90,45	170,6	49,80	226,9	251,6	73,35	237,15	184,92
n	0,285	0,260	0,297	0,265	0,170	0,302	0,276	0,249	0,315
Достоверность аппроксимации	0,990	0,964	0,991	0,970	0,935	0,996	0,987	0,991	0,985

Реологические исследования выявили, что при низких скоростях деформации изменения напряжения сдвига практически отсутствуют. При достижении критического значения скорости деформации наблюдается незначительный рост напряжения сдвига, который постепенно замедляется и стабилизируется. Это связано с реструктуризацией системы вблизи вращающегося ротора.

Установлено, что повышение содержания крахмала на 2 % приводит к увеличению напряжения сдвига в диапазоне от 120 до 390 Па, причем это более заметно проявляется при высоких скоростях деформации. Анализ реологических кривых (см. рис. 3) подтвердил наличие положительной корреляции между на-

пряжением сдвига и скоростью деформации: с увеличением скорости механического воздействия наблюдается рост напряжения сдвига. Причем, при скорости деформации до 30 об/мин изменения незначительны, при дальнейшем увеличении скорости происходит резкий рост, который несколько замедляется по мере приближения значения скорости к 50 об/мин.

С увеличением концентрации крахмала и уменьшением температуры коэффициент консистенции *K* возрастает, что связано с процессами набухания и клейстеризации зерен крахмала, приводящими к постепенному образованию коагуляционной структуры.

Индекс течения для образцов с крахмалом при температуре (50 ± 2) °С изменяется незначительно для разных концентраций крахмала, поэтому исследуемые массы можно отнести к вязкопластичным материалам. Для остывших образцов разница значений данного коэффициента уже больше, что связано с изменением консистенции начинки – при остывании происходит частичное гелеобразование структуры.

Заключение

Таким образом, в качестве загустителя рекомендуется использование крахмала с концентрацией 3 %, так как именно крахмал позволяет получать необходимую жидкую консистенцию начинки без образования студня. Формование корпусов осуществляют следующим образом. Оттемперированная шоколадная масса поступает на отливку в предварительно подогретые поликарбонатные формы. Формы с шоколадом подвергаются вибрации для равномерного заполнения пустот и удаления пузырьков воздуха, затем их переворачивают на 180° с последующей вертикальной вибрацией для удаления излишков шоколада и получения ячейки со стенками одинаковой толщины. Вытекший шоколад собирается и возвращается на темперирование. Формы возвращаются в первоначальное положение и охлаждаются при температуре 8…10 °С, после затвердевания шоколада они подаются на дозирование начинки. Каждая ячейка наполняется начинкой, имеющей температуру 25…28 °С. В целях предотвращения смешения начинки из черной смородины с шоколадом при заливке донышка необходимо, чтобы на поверхности образовалась тонкая пленка. Для этого формы охлаждают при температуре 8…10 °С. Конечными операциями производства конфет типа «Ассорти» на основе начинки из черной смородины является заливка донышек шоколадом, охлаждение в течение 25…30 мин и извлечение готовых изделий из форм с минимальным количеством брака.

Список литературы

1. Фролова, Н. А. Методологические подходы к созданию функциональных сахаристых кондитерских изделий : монография / Н. А. Фролова, И. Ю. Резниченко. – Благовещенск : Амурский государственный университет, 2020. – 144 с. doi: 10.22250/madfs.2020

2. Габдукаева, Л. З. Влияние структурообразователей на потребительские характеристики мармеладных изделий / Л. З. Габдукаева, Т. Ю. Гумеров, О. А. Решетник // Индустрия питания. – 2020. – Т. 5, № 1. – С. 50 – 57. doi: 10.29141/2500-1922-2020-5-1-6

3. Пищевые загустители, стабилизаторыи гелеобразователи / ред.-сост. А. Аймесон ; пер. с англ. С. В. Макарова. – СПб. : Профессия, 2012. – 408 с.

4. Нуриева, Э. Н. Поверхностные явления и дисперсные системы / Э. Н. Нуриева, Т. Р. Сафиуллина, С. В. Вдовина. – Москва-Берлин : Директмедиа Паблишинг, 2020. – 139 с.

5. Бывалец, О. А. Технология кондитерского производства : учеб. пособие / О. А. Бывалец. – М. : Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 120 с.

6. Павлов, А. Н. Физико-химические и коллоидно-химические основы пищевой технологии : учеб. пособие для студентов технологических направлений подготовки всех форм обучения / А. Н. Павлов. – М. : Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), 2015. – 58 с.

7. Зубченко, А. В. Физико-химические основы технологии кондитерских изделий : учебник для вузов / А. В. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Воронеж : Воронеж. гос. технол. акад., 2001. – 386 с.

8. Зубченко, А. В. Влияние физико-химических процессов на качество кондитерских изделий / А. В. Зубченко. – М. : Агропромиздат, 1986. – 295 с.

Influence of Structure-Forming Agents on Rheological Properties of Fillings in the Production of Chocolate Candies

P. M. Smolikhina✉, V. V. Aparsheva, O. S. Kharlamova

Department of Technology and Equipment for Food and Chemical Productio, Pm_smolihina@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: viscosity of filling; starch; pectin; rheological parameters; structure-forming agents; molding of chocolate shells.

Abstract: The article presents the results of experimental studies of the influence of different concentrations of starch and pectin on the properties of blackcurrant puree fillings to substantiate the possibility of their use in the production of chocolate candies of the "Assorted" type with liquid fillings. The influence of temperature conditions on the viscosity of fruit fillings is analyzed depending on the type and concentration of the structure-forming agent used. The coefficients of the Ostwald-de-Wille equation are determined at different shear rates.

References

1. Frolova N.A., Reznichenko I.Yu. *Metodologicheskiye podkhody k sozdaniyu funktsional'nykh sakharistykh konditerskikh izdeliy: monografiya* [Methodological approaches to the creation of functional sugar confectionery products: monograph], Blagoveshchensk: Amurskiy gosudarstvennyy universitet, 2020, 144 p. doi: 10.22250/madfs.2020 (In Russ.)

2. Gabdukayeva L.Z., Gumerov T.Yu., Reshetnik O.A. [Influence of structure-forming agents on consumer characteristics of marmalade products], *Industriya pitaniya* [Food industry], 2020, vol. 5, no. 1, pp. 50-57. doi: 10.29141/2500-1922-2020-5-1-6 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Aymeson A. (Comp.-Ed.); Makarova S.V. (Trans.) *Pishchevyye zagustiteli, stabilizatoryi geleobrazovateli* [Food thickeners, stabilizers and gelling agents], St. Petersburg: Professiya, 2012, 408 p. (In Russ.)

4. Nuriyeva E.N., Safiullina T.R., Vdovina S.V. *Poverkhnostnyye yavleniya i dispersnyye sistemy* [Surface phenomena and disperse systems], Moscow-Berlin: Direktmedia-Pablishing, 2020, 139 p. (In Russ.)

5. Byvalets O.A. *Tekhnologiya konditerskogo proizvodstva: ucheb. posobiye* [Confectionery production technology: textbook], Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023, 120 p. (In Russ.)

6. Pavlov A.N. *Fiziko-khimicheskiye i kolloidno-khimicheskiye osnovy pishchevoy tekhnologii: ucheb. posobiye dlya studentov tekhnologicheskikh napravleniy podgotovki vsekh form obucheniya* [Physicochemical and Colloid-Chemical Foundations of Food Technology: a textbook for students of technological areas of training of all forms of education], Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet tekhnologiy i upravleniya im. K.G. Razumovskogo (Pervyy kazachiy universitet), 2015, 58 p. (In Russ.)

7. Zubchenko A.V. *Fiziko-khimicheskiye osnovy tekhnologii konditerskikh izdeliy: uchebnik dlya vuzov* [Physicochemical foundations of confectionery technology: textbook for universities], Voronezh: Voronezh. gos. tekhnol. akad., 2001, 386 p. (In Russ.)

8. Zubchenko A.V. *Vliyaniye fiziko-khimicheskikh protsessov na kachestvo konditerskikh izdeliy* [Influence of physical and chemical processes on the quality of confectionery products], Moscow: Agropromizdat, 1986, 295 p. (In Russ.)

Einfluss von Strukturierungsmitteln auf rheologische Parameter von Füllungen bei der Herstellung von Schokoladen

Zusammenfassung: Der Artikel präsentiert die Ergebnisse experimenteller Studien über den Einfluss unterschiedlicher Stärke- und Pektinkonzentrationen auf die Eigenschaften von Füllungen aus schwarzem Johannisbeerpüree, um die Möglichkeit ihrer Verwendung bei der Herstellung von Pralinenmischungen mit flüssigen Füllungen zu untermauern. Der Einfluss der Temperaturbedingungen auf die Viskosität von Fruchtfüllungen ist abhängig von der Art und Konzentration des eingesetzten Strukturbildners analysiert. Die Koeffizienten der Ostwald-de-Wille-Gleichung sind für unterschiedliche Schergeschwindigkeiten ermittelt.

Influence de la structuration sur les paramètres rhéologiques des garnitures dans la production des chocolats

Résumé: Sont cites les résultats des études expérimentales sur l'influence de différentes concentrations d'amidon et de pectine sur les propriétés des garnitures de purée de cassis pour justifier la possibilité de leur utilisation dans la production des chocolats de type «Assorti» avec des garnitures liquides. Est analysé l'effet des régimes de température sur la viscosité des garnitures de fruits en fonction du type et de la concentration de l'agent structural utilisé. Sont établis les coefficients de l'équation d'Ostwald-de Waele à différents taux de cisaillement.

Авторы: ***Смолихина Полина Михайловна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; ***Апаршева Вера Викторовна*** – кандидат технических наук, заместитель начальника управления образовательных программ; ***Харламова Оксана Сергеевна*** – ассистент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УДК 621.929
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.321-334

РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ СМЕСИТЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СМЕСЕЙ

М. В. Севостьянов[1], А. М. Проценко[1]✉, В. С. Севостьянов[1], Д. А. Бушуев[2]

Кафедра технологических комплексов, машин и механизмов (1), nastya12rudchenko8@gmail.com; кафедра технической кибернетики (2), ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия

Ключевые слова: гомогенизация; моделирование; ресурсосбережение; рециркуляционный смеситель комбинированного действия; рециклинг.

Аннотация: Представлена конструкция рециркуляционного смесителя комбинированного действия. Разработаны лопастные механизмы в виде П-образного устройства и устройства со сферообразными полостями. Приведен расчет мощности привода камеры смешения добавок и камеры окончательной гомогенизации рециркуляционного смесителя комбинированного действия. Проведены экспериментальные исследования процесса смешения рамочными П-образным и дугообразным с сетчатой поверхностью устройствами. Получены графические зависимости коэффициента заполнения φ′ от частоты вращения вала *n*. Разработан алгоритм проектирования рециркуляционного смесителя комбинированного действия. Показаны виды товарной продукции из композиционных смесей с гетерогенными техногенными компонентами.

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем в строительной индустрии, химической, топливной и других отраслях промышленности является получение гомогенных композиционных смесей (**КС**) с гетерогенными техногенными компонентами (**ГТК**). Это существенным образом расширяет спектр новых материалов и изделий из них с заданными физико-механическими характеристиками, способствует развитию инновационных ресурсосберегающих технологий и решению существующих проблемных задач экологии [1 – 3]. В связи с тем что техногенные компоненты композиционных смесей имеют различные физико-механические характеристики, такие как повышенный коэффициент трения; влагоемкость; низкую исходную плотность; сыпучесть; малую пластичность; высокую удельную поверхность; различный гранулометрический состав и другие, распределение ГТК по всему объему смеси затруднено.

Проведенный классификационный анализ различных строительных смесей, в том числе на примере сухих строительных смесей, показывает их многообразие и широкие области использования, специфические особенности в зависимости от технологического назначения [4 – 7] (рис. 1).

Рис. 1. Классификация сухих строительных смесей и смесителей

Быстроразвивающиеся ресурсосберегательные технологии и технические средства свидетельствуют о необходимости разработки и создания специального смесительного оборудования с универсальными механо-технологическими возможностями, обеспечивающими высокое качество получаемой продукции [8 – 10].

С учетом всестороннего анализа отечественных и зарубежных конструкций агрегатов для гомогенизации техногенных материалов, а также вышеуказанных заключений проведены конструкторско-технологические разработки, теоретические и экспериментальные исследования процессов смешения по созданию рециркуляционного смесителя многофункционального действия. Исследования направлены на реализацию постадийных процессов гомогенизации КС с ГТК, макро- и микросмешения основных компонентов, расширение технологических возможностей агрегата и совершенствование конструкций рабочих органов [11, 12].

Рециркуляционный смеситель комбинированного действия обеспечивает следующие преимущества (рис. 2):

– многофункциональность при получении различных составов композиционных смесей с использованием гетерогенных компонентов;

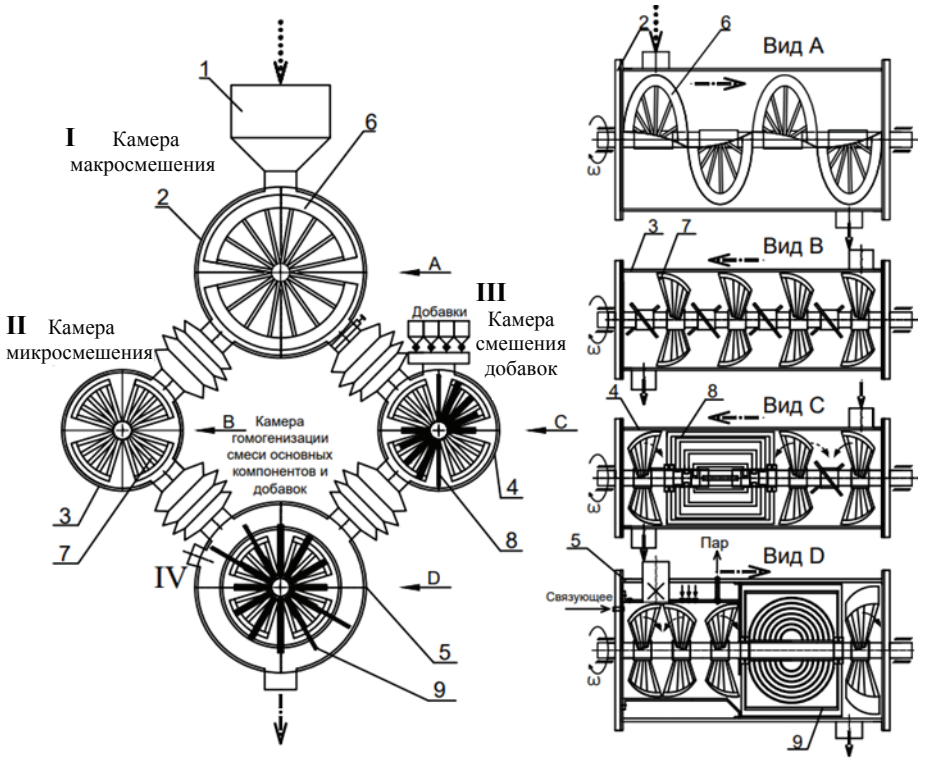
– постадийное макро- и микросмешение компонентов с возрастающей интенсификацией процесса смешения на каждой стадии;

– использование в камерах смесителя винтообразных, П-образных и сферообразных рабочих органов с развитым геометрическим профилем интенсифицирующего действия;

– реализация однозаходными и двухзаходными винтовыми устройствами (**ДВУ**) внутреннего рециклинга гомогенизируемой смеси и разрушение застойных зон;

– возможность варьирования схем установки рабочих органов в рециркуляционном смесителе с получением гомогенных композиционных смесей различного технологического назначения [11].

Рециркуляционный смеситель оснащен загрузочным бункером *1* исходных компонентов и камерами, имеющими перемешивающие устройства различного геометрического профиля, размеров и технологического назначения (см. рис. 2): однозаходными винтовыми устройствами рециркуляционного действия *6* – камера макросмешения *2*; двухзаходными винтовыми устройствами рециркуляционного действия *7* – камера микросмешения *3*; камера смешения добавок *4*; камера интенсивной гомогенизации смесей *5*.

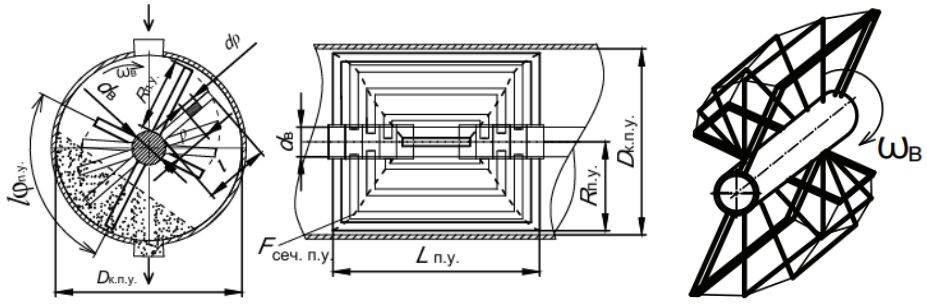


а) *б*)

Рис. 2. Рециркуляционный смеситель комбинированного действия:
а – общий вид; *б* – камеры гомогенизации

Кроме того, камеры рециркуляционного смесителя оснащены П-образным устройством *8* и сферообразным устройством интенсифицирующего действия *9* (рис. 3). Каждое из вышеуказанных устройств выполняет заданные технологические функции, а их наличие учитывается при расчете потребляемой мощности приводов камер рециркуляционного смесителя [13].

Процесс гомогенизации смеси гетерогенных добавок реализуется в камере *4*, содержащей как питающие винтовые устройства двухстороннего действия, так и пару ДВУ рециркуляционного действия.



а) *б*)

Рис. 3. Схема П-образного устройства интенсифицирующего действия:
а – горизонтальные проекции; *б* – аксонометрическое изображение

Для реализации более сложного технологического процесса гомогенизации разнокомпонентных добавок (фибронаполнителей, ультрадисперсных или поризованных компонентов, суперпластификаторов, различных пигментов-красителей, технического углерода [14] и др.) целесообразно использовать высокоскоростной режим рабочих органов камер III и IV.

В этом случае кинематика привода предусматривает высокоскоростное вращение приводного вала, то есть исключение редуктора и цепной передачи, передающих $M_{кр}$ на входной вал камеры III.

Мощность привода в данном случае складывается из следующих составляющих, Вт:

$$N_{III} = \frac{N_{ДВУ_{пит_{III}}} + N_{инт.\,д_{III}} + N_{рец_{III}} + N_{тр_{III}}}{\eta_{III}}, \qquad (1)$$

где $N_{ДВУ_{пит_{III}}}$ – мощность, расходуемая питающим ДВУ; $N_{инт.\,д_{III}}$ – мощность, затрачиваемая П-образным устройством интенсифицирующего действия; $N_{рец_{III}}$ – мощность, расходуемая ДВУ рециркулирующего действия; $N_{тр_{III}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление трения при перемещении смеси вдоль корпуса камеры III; η_{III} – КПД привода камеры III смешения добавок.

Мощность привода, Вт, камеры IV определяется по формуле

$$N_{IV} = \frac{N_{рец_{IV(dk)}} + N_{ДВУ_{пит_{IV(dk)}}} + N_{инт.\,д_{IV(Dk)}} + N_{выгр_{IV(Dk)}} + N_{тр_{IV}}}{\eta_{IV}}, \qquad (2)$$

где $N_{рец_{IV(dk)}}$ – мощность, расходуемая на рециклинг смеси ДВУ в камере IV диаметром $dk \le Dk$; $N_{ДВУ_{пит_{IV(dk)}}}$ – мощность, затрачиваемая на подачу смеси из камеры рециклинга диаметром dk в устройство интенсифицирующего действия со сферообразными полостями; $N_{инт.\,д_{IV(Dk)}}$ – мощность, затрачиваемая устройством интенсифицирующего действия со сферообразными полостями, установленным в камере диаметром Dk; $N_{выгр_{IV(Dk)}}$ – мощность, расходуемая на выгрузку гомогенизируемого материала из камеры IV; $N_{тр_{IV}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения при перемещении смеси в камерах диаметром dk и Dk; η_{IV} – КПД привода камеры IV.

Значение $N_{инт.\,д_{IV(Dk)}}$, в дальнейшем $N_{инт.\,сф}$, можно определить, используя следующие схемы (рис. 3, 4) и расчеты.

При этом, как было указано ранее, учитываем, что для реализации интенсивного внутреннего рециклинга гомогенизируемой смеси использовано специальное объемное устройство со сферообразными смежными полостями (см. рис. 4). Данное устройство не только обеспечивает большую степень свободы (перемещения) гетерогенных частиц в трех координатных осях *XYZ*, что активно влияет на процесс гомогенизации, но и направленное движение материального потока из одной смежной сферообразной полости в другую через соединяющий их канал.

Таким образом, реализуется интенсивный процесс окончательной гомогенизации по трем направлениям: 1) внутри каждой сферообразной полости; 2) при перемещении из одной смежной полости в другую; 3) при перемещении гомогенизируемой смеси из сферообразных полостей в камеру смешения и обратно.

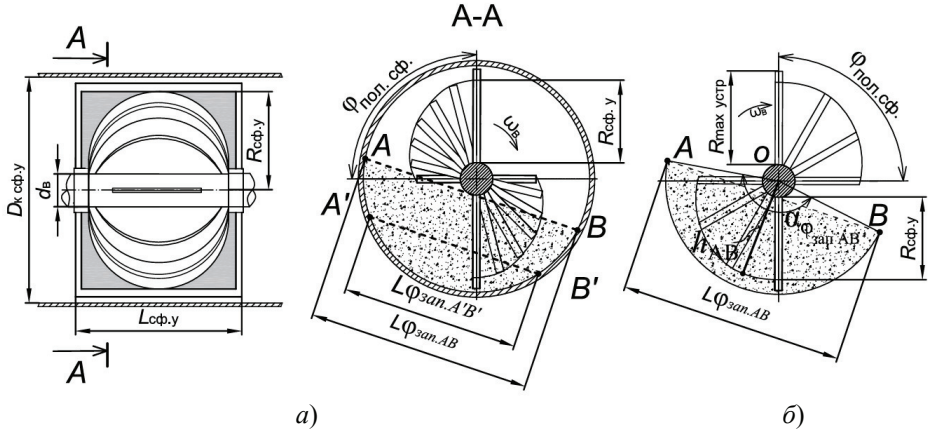


Рис. 4. Схемы устройства интенсифицирующего действия со сферообразными полостями:

а – общий вид; *б* – схема к расчету $l_{L_{\varphi_{зап}}}$

При этом характерной особенностью разработанного устройства является малый объем занимаемого пространства камеры смешения. Кроме того, данное техническое решение позволяет реализовать также процесс микрогранулирования предварительно увлажненных смесей, что существенно расширяет область их использования. В указанном варианте сферообразные полости (с внутренней стороны поверхности) обрамлены, на дугах, перфорированным материалом. Это позволяет рециркулировать гранулируемый продукт как по внутреннему контуру (в смежных сферообразных полостях), так и по внешнему (просыпи – в камеру смешения). Данное техническое решение расширяет технологические возможности устройства:

а) обеспечивает интенсификацию процесса гомогенизации смеси;

б) реализует при необходимости процесс микрогранулирования смеси с предварительным ее пароувлажнением (или введением пластифицирующих добавок).

Мощность, затрачиваемая устройством интенсифицирующего действия со сферообразными полостями, равна

$$N_{инт.сф} = 2V_{сф.устр}K_{зап.сф.устр}n_{в}\rho_{см}g\,l_{L_{\varphi_{зап}}}k_{сопр}\,, \qquad (3)$$

где $K_{зап.сф.устр}$ – коэффициент заполнения сферообразного устройства, зависящий от «живого сечения» его боковой поверхности, частоты вращения вала $n_{в}$, а также от коэффициента загрузки камеры смешения (при $K_{зап.сф.устр} = 0{,}2\ldots0{,}4$; $\varphi_{зап} = 0{,}3\ldots0{,}5$); $\rho_{см}$ – насыпная плотность смеси, кг/м^3; g – ускорение силы тяжести, м^2/с; $l_{L_{\varphi_{зап}}}$ – длина части окружности, описываемой образующей устройства радиусом $R_{max\,устр}$ при прохождении через слой материала с коэффициентом заполнения $\varphi_{зап}$; $k_{сопр}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление слоя смеси при прохождении его сферообразными полостями, $k_{сопр} = 1{,}28$ [15].

При коэффициенте заполнения камеры $\varphi_{зап}$ длина части окружности, описываемой образующей сферообразной полости устройства радиусом $R_{max\,устр}$ (см. рис. 4), равна

$$l_{L_{\varphi_{\text{зап}}AB}} = \frac{\pi R_{\max\,\text{устр}} \alpha_{\varphi_{\text{зап}}AB}}{180}, \qquad (4)$$

где $\alpha_{\varphi_{\text{зап}}AB}$ – центральный угол, ограниченный дугой AB, °.

При этом хорда AB сегмента определяет коэффициент заполнения камеры смешения $\varphi_{\text{зап}}$, а хорда $A'B'$ – коэффициент заполнения сферообразных полостей устройства после просева материала через их боковую поверхность.

Величины $R_{\max\,\text{устр}}$ и угла $\alpha_{\varphi_{\text{зап}}AB}$ определяем по формулам:

$$R_{\max\,\text{устр}} = \frac{l_{AB}^2 + 4h^2}{8h}; \qquad \text{tg}\frac{\alpha_{\varphi_{\text{зап}}AB}}{4} = \frac{2h}{l_{AB}}, \qquad (5)$$

где l_{AB} – длина хорды сектора, м; h – высота сегмента, м.

Тогда, с учетом указанных значений параметров, выражение (3) принимает вид

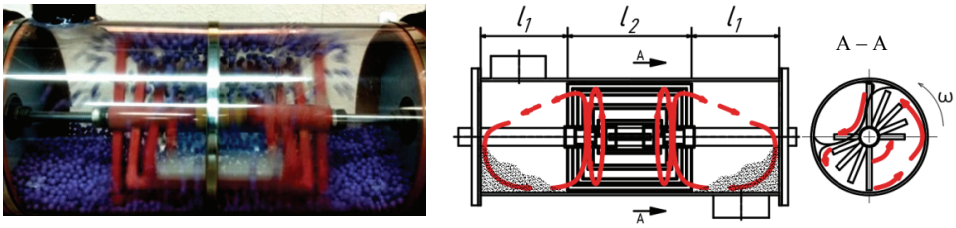
$$N_{\text{инт. сф}} = 2(0{,}033...0{,}035)\pi^2 R^4_{\max\,\text{устр}}\, n_{\text{в}}\, \rho_{\text{см}}\, g\, \alpha_{\varphi_{\max}} K_{\text{зап.сф.устр}}. \qquad (6)$$

С учетом реального использования гетерогенных компонентов смеси с различными физико-механическими характеристиками (гранулометрическим составом, геометрией частиц, коэффициентами внутреннего и внешнего трения, влажности, сыпучести и др.) интенсивность внутреннего рециклинга может быть увеличена за счет конструктивно-технологического исполнения сферообразных полостей.

Для установления основных закономерностей и изучения процесса гомогенизации смеси проведено моделирование процессов смешения. При исследовании процесса смешения чаще всего применяют физическое и имитационное моделирование. В целях повышения сложно-пространственного воздействия на материал и изучения процесса движения его в рамочном П-образном устройстве проводились экспериментальные исследования с использованием модельной установки периодического режима работы (рис. 5).

Установлено, что с увеличением частоты вращения вала возрастает зона воздействия на перемешиваемую среду l_2 и уменьшаются застойные зоны в торцах барабана смесителя l_1 (см. рис. 5).

Анализ графических зависимостей $l_2 = f(n)$ показывает, что с увеличением частоты вращения вала возрастает линейно и зона воздействия l_2 на перемешиваемую среду. При этом застойные зоны l_1 в торцах барабана смесителя уменьшаются.



а) *б*)

Рис. 5. Съемка процесса гомогенизации смеси рамочным П-образным устройством в барабане с прозрачным корпусом (*а*) и схема воздействия данного устройства (*б*)

Кроме того, проведенные исследования показали, что использование рамочного П-образного устройства позволяет регулировать зону l_2 интенсификации процесса гомогенизации за счет изменения частоты вращения вала смесителя. Также рассмотрены варианты применения дополнительных лопастных устройств для организации внутренних потоков и рециклинга материала в барабане смесителя.

Для изучения процесса движения материала внутри рабочих полостей рамочного дугообразного устройства с сетчатой поверхностью проводились экспериментальные исследования с использованием модельной установки (рис. 6).

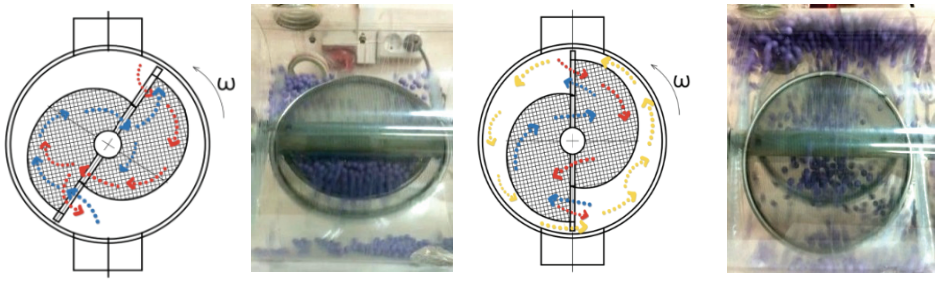
Установленные закономерности представлены в виде графической зависимости $\varphi' = f(n)$ (рис. 7).

Графическая зависимость $\varphi' = f(n)$ отражает три процесса (I, II, III), при которых:

I – материал больше перекатывается в рабочих полостях, его можно обозначить как «зона окатывания»;

II – материал интенсивно перемещается как внутри рабочих полостей, так и снаружи по стенкам барабана, его можно обозначить как «зона смешения»;

III – материал вытесняется из полостей центробежной силой и прижимается к стенкам барабана, его можно обозначить как «зона центрифугирования».



а) *б*)

Рис. 6. Схема движения материальных потоков внутри камеры барабана и полостей рамочного дугообразного устройства с сетчатой поверхностью:
а, *б* – соответственно при частоте вращения вала n = 20…50 об/мин и n = 100…120 об/мин

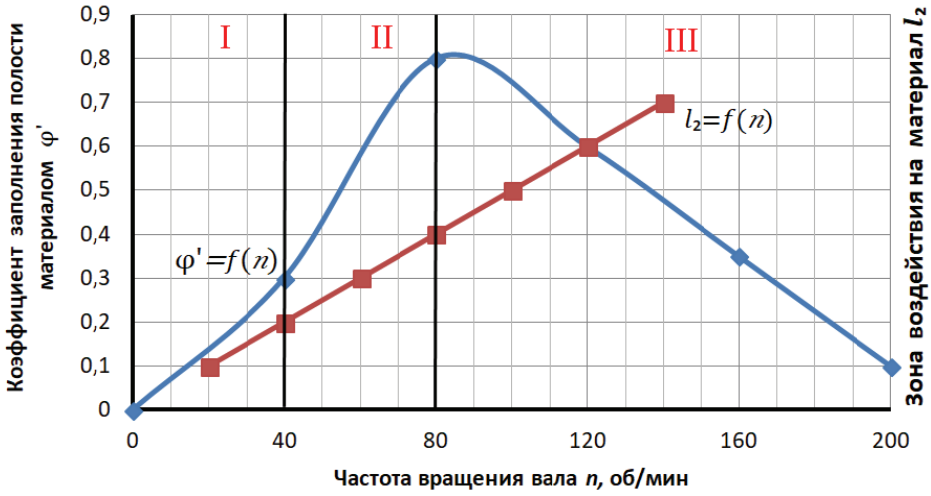


Рис. 7. Графические зависимости $l_2 = f(n)$ и $\varphi' = f(n)$

Проведенные исследования показали, что при изменении частоты вращения вала смесителя со сферообразными полостями можно регулировать процесс перемещения материала как внутри полостей, так и во время его нахождения внутри барабана смесителя. Это позволяет управлять процессами гомогенизации композиционной смеси и осуществлять процесс микрогранулирования смеси после предварительного смешения ее со связующим в парообразном или распыленном состоянии.

Несмотря на многофункциональные технологические возможности патентозащищенной конструкции рециркуляционного смесителя, расширенную комбинаторику конструктивного исполнения и применение различных рабочих органов агрегата, необходимо использовать специальный алгоритм (рис. 8).

С учетом проведенных теоретических исследований, моделирования технологических процессов и полученных экспериментальных данных спроектирован и изготовлен опытно-промышленный агрегат – рециркуляционный смеситель комбинированного действия (рис. 9).

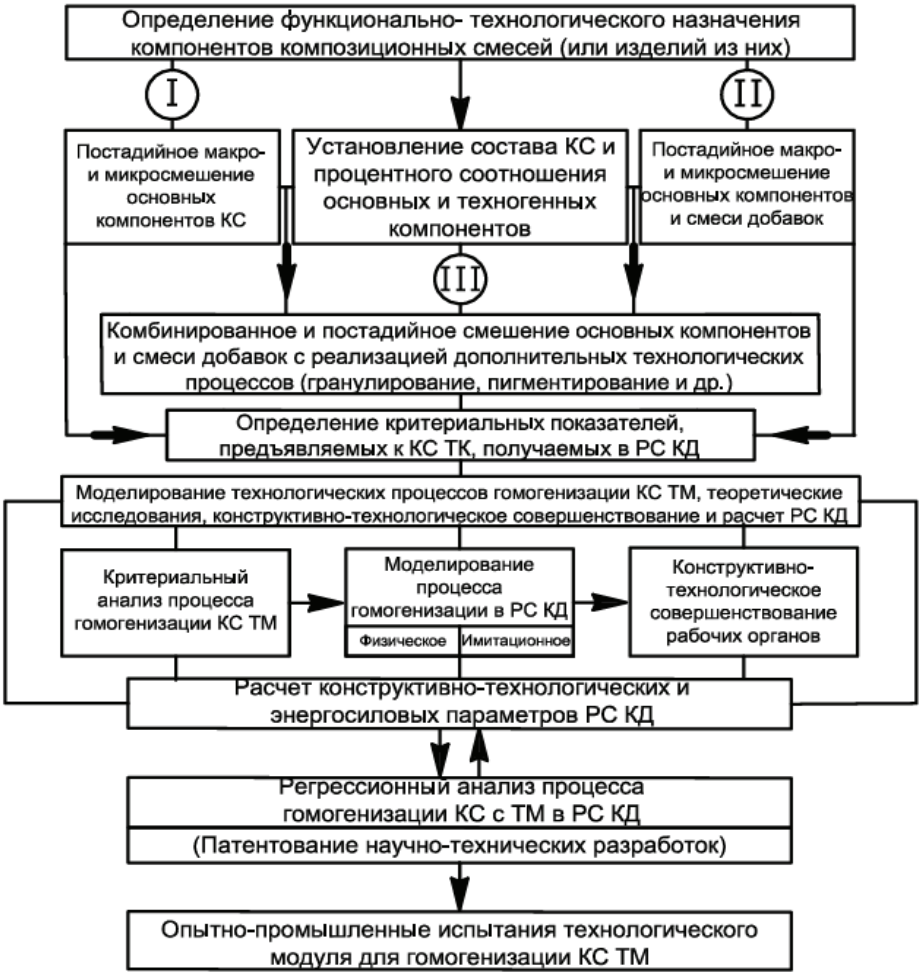
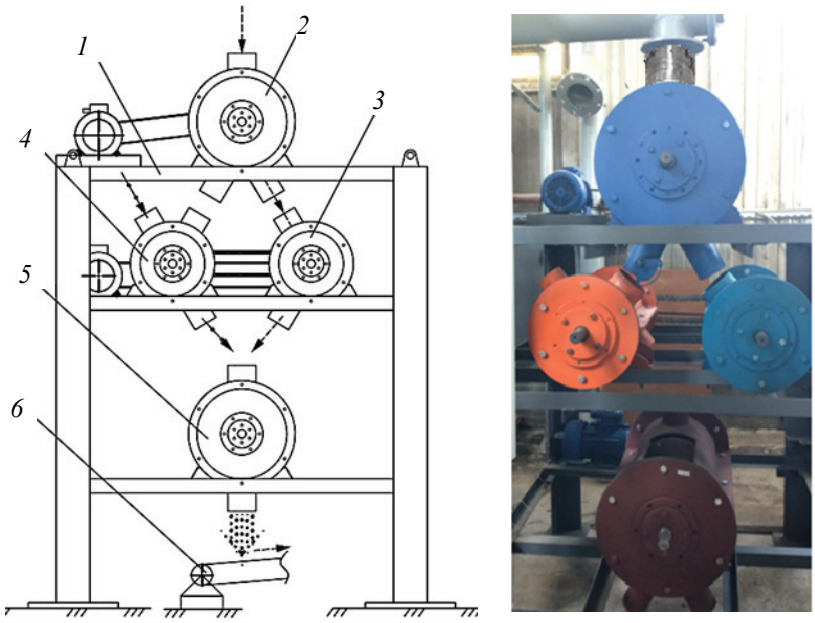


Рис. 8. Алгоритм проектирования рециркуляционного смесителя комбинированного действия для гомогенизации композиционных смесей с техногенными гетерогенными компонентами



а) *б*)

Рис. 9. Схема технологического модуля (*а*) и опытно-промышленный агрегат – рециркуляционный смеситель комбинированного действия (*б*):
1 – рама; *2* , *3* – камеры макро- и микросмешения соответственно;
4 – камера смешения добавок; *5* – камера гомогенизации смеси основных компонентов и добавок; *6* – питатель гомогенизируемой смеси

Технические характеристики рециркуляционного смесителя комбинированного действия.

Размер камер барабанов РС КД $D_{св} \times L$, 10^{-3} м:	
макросмешения	320 × 600
микросмешения	230 × 600
смешения добавок	230 × 600
гомогенизации смеси основных компонентов и добавок	320 × 600
Частота вращения валов камер смесителя $n_в$, $м^{-1}$*:	
макросмешения	20…50
микросмешения	40…100
смешения добавок	80…400
гомогенизации смеси основных компонентов и добавок	30…120
Угол подъема винтовых линий устройств, °:	
$\alpha_{ОВУ}$	10…35
$\alpha_{ДВУ}$	5…20
Коэффициент заполнения материалом барабана смесителя φ_{ik}	0,2…0,5
Расстояние между лопастями $L_л$, 10^{-3} м	20…100
Высота пластин винтовых рабочих элементов смесителя, 10^{-3} м	30…90
Производительность, кг/ч *	40…500
Габаритные размеры агрегата, мм:	
длина	1230
ширина	1320
высота	1980
Масса, кг	980

* В зависимости от физико-механических характеристик компонентов смесей, конструктивного исполнения устройств и технологических режимов работы отдельных блоков смесителя.

Рис. 10. Различные виды продукции из композиционных смесей разного технологического назначения

Выполненные научно-технические разработки рекомендуется использовать в различных ресурсоэнергосберегающих технологиях, предназначенных для получения композиционных механоактивированных смесей, смесей с различными гетерогенными компонентами и фибронаполнителями, теплоизоляционных изделий с использованием технического углерода и других видов инновационной продукции (рис. 10).

Рециркуляционный смеситель комбинированного действия и разработанные технологии используются в технологических комплексах технопарка БГТУ им. В. Г. Шухова, научно-производственных линиях ООО «ТК «Экотранс» и других производств в рамках выполняемых проектов.

Заключение

Рассмотрена актуальность получения композиционных смесей с гетерогенными техногенными компонентами, проведены классификации сухих строительных смесей и конструкций смесителей. Разработана конструкция патентозащищенного рециркуляционного смесителя комбинированного действия, где представлены лопастные механизмы в виде П-образного устройства и устройства со сферообразными полостями. Проведен расчет мощности привода камеры смешения добавок и камеры окончательной гомогенизации рециркуляционного смесителя комбинированного действия.

Экспериментальные исследования зависимости коэффициента заполнения интенсифицирующего устройства от частоты вращения вала n показали, что использование рамочного П-образного устройства позволяет регулировать зону интенсификации процесса гомогенизации, а использование сферообразных полостей позволяет управлять процессами гомогенизации композиционной смеси и осуществлять процесс ее микрогранулирования после предварительного смешения ее со связующим в парообразном или распыленном состоянии. Разработан алгоритм проектирования рециркуляционного смесителя комбинированного действия для приготовления композиционных смесей с ТГК. Представлены опытно-промышленный образец спроектированного рециркуляционного смесителя комбинированного действия, а также виды приготавливаемой товарной продукции из композиционных смесей с гетерогенными техногенными компонентами.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN-2024-0002) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Список литературы

1. Improvement of Technical Means for Recycling of Technogenic Waste to Construction Fiber / S. Klyuev, V. Sevostyanov, M. Sevostyanov, R. Fediuk [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16, No. 7. – P. e01071. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01071

2. Технологический комплекс для производства композиционных смесей с техногенными материалами / В. С. Севостьянов, С. В. Клюев, М. В. Севостьянов [и др.] // СТИН. – 2022. – № 12. – С. 11 – 14.

3. Технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов / С. Н. Глаголев, Н. Т. Шеин, В. С. Севостьянов, В. В. Оболонский, Р. Ю. Шамгулов // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 12. – С. 11 – 15. doi: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15

4. Исследование изменения концентрации ключевого компонента сухой смеси в горизонтальном лопастном смесителе с цилиндрическими стержнями / С. И. Ханин, В. П. Воронов, Н. О. Кикин [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2022. – № 2. – С. 94 – 101. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-94-101

5. Переработка отходов минераловатного производства / В. В. Фирсов, В. В. Самойленко, А. Н. Блазнов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2015. – № 4-2. – С. 61 – 65.

6. Разработка и техническое совершенствование агрегатов для комплексной переработки техногенных материалов / А. М. Проценко, В. А. Бабуков, П. Ю. Горягин, И. Г. Мартаков // Образование. Наука. Производство : материалы XII Междунар. молодежного форума, Белгород, 01 – 20 октября 2020 г. – Белгород, 2020. – С. 1105 – 1112.

7. Проценко, А. М. Классификация смесителей для композиционных смесей с гетерогенными компонентами / А. М. Проценко, И. Г. Мартаков // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгород, 30 апреля 2021 г. – Белгород, 2021. – С. 1808 – 1811.

8. Гарабажиу, А. А. Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей / А. А. Гарабажиу // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 27 – 42.

9. Богомолов, А. А. Современное смесительное оборудование для производства строительных смесей / А. А. Богомолов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2007. – № 38. – С. 31 – 35.

10. Евсеев, А. В. Классификации нонмиксинговых смесевых компонентов, продуктов и устройств / А. В. Евсеев // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 287 – 296. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.287-296

11. Пат. 2809971 Российская Федерация, МПК B01F 27/70. Способ постадийной гомогенизации композиционных смесей / Глаголев С. Н., Севостьянов В. С., Бушуев Д. А., Севостьянов М. В., Клюев С. В., Проценко А. М. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2023115756 : заявл. 15.06.2023 : опубл. 19.12.2023, Бюл. № 35. – 14 с.

12. Пат. 2788202 C1 Российская Федерация, МПК A23N 17/00. Рециркуляционный смеситель комбинированного действия / Глаголев С. Н., Севостьянов В. С., Проценко А. М., Севостьянов М. В., Клюев С. В., Шамгулов Р. Ю. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2022112968 : заявл. 13.05.2022 : опубл. 17.01.2023, Бюл. № 2. – 19 с.

13. Проценко, А. М. Интенсификация процессов гомогенизации смесей в рециркуляционном смесителе / А. М. Проценко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 346-357. doi: 10.17277/вестник.2024.02.с.346-357.

14. Processing and Granulation of Carbon Black / V. S. Sevost'yanov, R. Y. Shamgulov, A. M. Protsenko, A. S. Apatenko // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42, No. 5. – P. 538 – 540. doi: 10.3103/S1068798X22050240

15. Карпушкин, С. В. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов : учеб. пособие / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 168 с.

Recirculation Mixer of Combined Action for Homogenization of Composite Mixtures

M. V. Sevostyanov[1], A. M. Protsenko[1]✉, V. S. Sevostyanov[1], D. A. Bushuev[2]

Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms (1), nastya12rudchenko8@gmail.com; Department of Technical Cybernetics (2), Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

Keywords: homogenization; modeling; resource saving; recirculation mixer of combined action; recycling.

Abstract: The design of a recirculation mixer of combined action is presented. Blade mechanisms in the form of a U-shaped device and a device with spherical cavities are developed. The calculation of the drive power of the additive mixing chamber and the final homogenization chamber of the combined-action recirculation mixer is presented. Experimental studies of the mixing process by frame U-shaped and arc-shaped devices with a mesh surface are conducted. Graphic dependencies of the filling factor φ' on the shaft rotation frequency *n* are obtained. An algorithm for designing a combined-action recirculation mixer is developed. Types of commercial products from composite mixtures with heterogeneous technogenic components are shown.

References

1. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Fediuk R. [et al.] Improvement of Technical Means for Recycling of Technogenic Waste to Construction Fiber, *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 16, no. 7, pp. e01071. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01071

2. Sevost'yanov V.S., Klyuyev S.V., Sevost'yanov M.V. [et al.] [Technological complex for the production of composite mixtures with technogenic materials], *STIN*, 2022, no. 12, pp. 11-14. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Glagolev S.N., Shein N.T., Sevost'yanov V.S., Obolonskiy V.V., Shamgulov R.Yu. [Technologies for complex processing of municipal solid waste], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2020, vol. 24, no. 12, pp. 11-15. doi: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O. [et al.], [Study of changes in the concentration of a key component of a dry mixture in a horizontal paddle mixer with cylindrical rods], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological

University named after V. G. Shukhov], 2022, no. 2, pp. 94-101. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-94-101 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Firsov V.V., Samoylenko V.V., Blaznov A.N. [et al.], [Processing of mineral production waste], *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Vestnik], 2015. no. 4-2, pp. 61-65. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Protsenko A.M., Babukov V.A., Goryagin P.Yu., Martakov I.G. *Obrazovaniye. Nauka. Proizvodstvo: materialy XII Mezhdunar. molodezhnogo foruma* [Education. Science. Production: materials of the XII Int. youth forum], Belgorod, 01-20 October 2020, Belgorod, 2020, pp. 1105-1112. (In Russ.)

7. Protsenko A.M., Martakov I.G. *Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh BGTU im. V. G. Shukhova* [Int. scientific and technical. conf. of young scientists of BSTU named after V. G. Shukhov], Belgorod, 30 April 2021, Belgorod, 2021, pp. 1808-1811. (In Russ.)

8. Garabazhiu A.A. [Intensification of mixing processes of dry bulk materials in modern mixer designs], *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Construction Science and Technology], 2010, no. 4, pp. 27-42. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Bogomolov A.A. [Modern mixing equipment for the production of building mixtures], *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University], 2007, no. 38, pp. 31-35. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Yevseyev A.V. [Classifications of non-mixing mixture components, products and devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 287-296. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.287-296 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Glagolev S.N., Sevost'yanov V.S., Bushuyev D.A., Sevost'yanov M.V., Klyuyev S.V., Protsenko A.M. *Sposob postadiynoy gomogenizatsii kompozitsionnykh smesey* [Method for stepwise homogenization of composite mixtures], Russian Federation, 2023, Pat. 2809971 (In Russ.)

12. Glagolev S.N., Sevost'yanov V.S., Protsenko A.M., Sevost'yanov M.V., Klyuyev S.V., Shamgulov R.Yu. *Retsirkulyatsionnyy smesitel' kombinirovannogo deystviya* [Recirculation mixer of combined action], Russian Federation, 2022, Pat. 2788202 (In Russ.)

13. Protsenko, A.M. [Intensification of homogenization processes of mixtures in a recirculation mixer], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no 2, pp 346-357. doi: 10.17277/вестник.2024.02.с.346-357.

14. Sevost'yanov V.S., Shamgulov R.Y., Protsenko A.M., Apatenko A.S. Processing and Granulation of Carbon Black, *Russian Engineering Research*, 2022, vol. 42, no. 5, pp. 538-540. doi: 10.3103/S1068798X22050240

15. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B. *Raschety i vybor mekhanicheskikh peremeshivayushchikh ustroystv vertikal'nykh yemkostnykh apparatov: ucheb. posobiye* [Calculations and selection of mechanical mixing devices of vertical capacitive apparatuses: textbook], Tambov: Izdatel'stvo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2009, 168 p. (In Russ.)

Umwälzmischer kombinierter Wirkung zur Homogenisierung der Kompositionsmischungen

Zusammenfassung: Es ist der Entwurf eines kombinierten Umwälzmischers vorgestellt. Es sind Paddelmechanismen in Form einer U-förmigen Vorrichtung und einer Vorrichtung mit kugelförmigen Hohlräumen entwickelt. Die Berechnung der Antriebsleistung der Zusatzmischkammer und der Endhomogenisierungskammer des kombinierten Rezirkulationsmischers ist angegeben. Es sind experimentelle Untersuchungen des Mischvorgangs bei U-förmigen und bogenförmigen

Rahmengeräten mit Gitteroberfläche durchgeführt. Es sind grafische Abhängigkeiten des Füllfaktors φ' von der Wellendrehzahl *n* ermittelt. Ein Entwurfsalgorithmus für den Rezirkulationsmischer mit kombinierter Wirkung ist entwickelt. Es sind Typen kommerzieller Produkte aus Verbundmischungen mit heterogenen künstlichen Komponenten gezeigt.

Mélangeur de recyclage à action combinée pour homogénéisation de mélanges composites

Résumé: Est présentée la conception du mélangeur de recyclage à action combinée. Sont développés des mécanismes à lames sous la forme d'un dispositif en forme de U et d'un dispositif avec des cavités sphériques. Est donné le calcul de la puissance d'entraînement de la chambre de mélange des additifs et de la chambre d'homogénéisation finale du mélangeur de recyclage à action combinée. Sont réalisées des études expérimentales sur le processus de mélange de dispositifs en forme de U et en forme d'arc avec une surface maillée. Sont obtenues les dépendances graphiques du facteur de remplissage φ' de la vitesse de rotation de l'arbre *n*. Est développé l'algorithme de conception du mélangeur de recyclage à action combinée. Sont présentés les types des produits commercialisables à partir de mélanges composites avec des composants technologiques hétérogènes.

Авторы: ***Севостьянов Максим Владимирович*** – доктор технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; ***Проценко Анастасия Максимовна*** – аспирант, ассистент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; ***Севостьянов Владимир Семенович*** – доктор технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; ***Бушуев Дмитрий Александрович*** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия.

УДК 62-672
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.335-343

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАБОТУ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПОЛИМЕРНОЙ ПРОКЛАДКОЙ

Г. В. Божко[1]✉, М. С. Фокина[2], А. С. Соколов[3], А. С. Баскаков[1], И. В. Коновалов[1]

Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии» (1), hitema@npp-htm.ru; Центр проектной деятельности (2); факультет химической технологии и биотехнологии (3); ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

Ключевые слова: деформация; коэффициент термического расширения; крепежные детали; нагрузка; прокладка; температура; фланцевое соединение.

Аннотация: При работе фланцевых соединений при температуре возникают дополнительные термические нагрузки, которые могут привести к разгерметизации соединения. Проанализировано влияние температуры на работу соединения и возможность компенсации температурных нагрузок. Предложено использование конструкций уплотнений с компенсационным кольцом, коэффициент термического расширения которого ниже, чем у других деталей соединения. Проведены теоретические и экспериментальные исследования с винипластовой прокладкой. Для проведения экспериментов созданы физическая модель фланцевого соединения и установка для исследования.

Введение

Разъемные соединения оборудования и трубопроводов используются во всех отраслях промышленности. В технологических схемах химических производств на каждую единицу оборудования приходится минимум три-четыре фланцевых соединения для его эксплуатации и ремонта. Безаварийная работа химического оборудования определяется не столько прочностью отдельных деталей, сколько герметичностью соединений, обеспечиваемой узлом уплотнения, основным элементом которого является прокладка [1]. От качества его работы зависит безопасная эксплуатация аппаратов, машин и агрегатов и качество получаемых химических продуктов.

Герметичность фланцевого соединения и влияние на нее внешних факторов

Фланцевое соединение – это комплекс взаимосвязанных элементов: фланцев, крепежных болтов и уплотнительного элемента (прокладки), выполненных из материалов с различными физико-механическими свойствами. Как правило, фланцевое соединение работает под влиянием различных внешних факторов, к которым относятся давление среды, ее температура, время эксплуатации и др. [2]. Чтобы избежать воздействия внешних факторов требуется увеличение материальных и экономических затрат на создаваемое разъемное соединение.

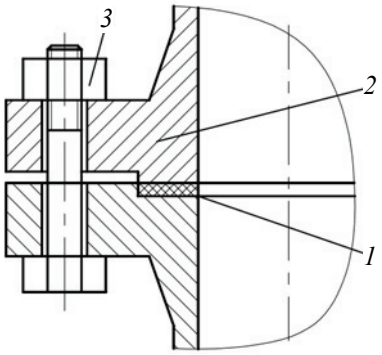


Рис. 1. Конструктивная схема разъемного фланцевого соединения принудительного типа с пластичным уплотнителем:
1 – фланец; *2* – прокладка;
3 – крепежные детали

Фланцевые соединения работают в двух случаях – при сборке соединения и в рабочих условиях (рис. 1). При сборке соединения крепежными деталями прокладку нагружают бо́льшим усилием, чем необходимо в рабочих условиях. Это связано с тем, что при подаче в аппарат среды под давлением происходит частичная разгрузка прокладки и на ней должна остаться удельная нагрузка, обеспечивающая условную герметичность соединения. Сборка разъемного герметичного соединения (**РГС**) обычно проводится при 20 °С, а при его работе возможно повышение температуры, что вызывает в нем дополнительную нагрузку [3]. Если этого не учитывать, возможна разгерметизация РГС со всеми отрицательными последствиями.

Цель работы – анализ влияния температуры на работу соединения и возможность частичной компенсации температурных нагрузок.

Расчет фланцевых соединений проводят по ГОСТ 4233.1–2017 [4], в котором указываются общие требования по нормам и методам расчета на прочность сосудов и аппаратов и по ГОСТ 4233.4–2017 [5], где представлен расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. Цель расчета – определение геометрических и силовых параметров деталей соединения, обеспечивающих его прочность и плотность в рабочих условиях при воздействии внешних факторов.

Согласно ГОСТам расчет состоит их следующих этапов:

– определение усилия предварительной затяжки крепежных деталей соединения при его сборке с учетом усилия, действующего на прокладку в рабочих условиях, необходимого для обеспечения герметичности фланцевого соединения;

– проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки;

– расчет на прочность элементов фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях при действии давления, усилий в болтах (шпильках), необходимых для обеспечения герметичности фланцевого соединения, и других нагрузок;

– проверка углов поворота фланцев;

– расчет элементов фланцевого соединения на малоцикловую усталость в случае, если нагружение носит циклический характер.

Для обеспечения герметичности соединения из расчета определяется нагрузка на прокладку $Q_п$, которая должна быть равна или больше необходимого усилия на прокладке в рабочих условиях $[Q_п]$

$$Q_п = Q_з - \alpha Q_г + \Delta Qt - \int V(\tau)d\tau \geq [Q_п], \qquad (1)$$

где $Q_п, Q_з, Q_г$ – усилие на прокладке в рабочих условиях, затяжки, от давления среды, соответственно, Н; α – коэффициент жесткости соединения, интеграл обозначает падение нагрузки в соединении с течением времени τ, с; ΔQt – изменение нагрузки с изменением температуры; $V(\tau)$ – скорость падения нагрузки, Н/с.

Из уравнения (1) видно, что повышение температуры ведет к увеличению нагрузки на прокладку и на все детали соединения.

Теоретические исследование влияния температуры и ее компенсации на силовые и геометрические параметры соединения

Повышение температуры фланцевого соединения оказывает влияние на его работу по разным причинам. Во-первых, у жидкой среды уменьшается плотность и соответственно повышается проницаемость, что необходимо учитывать. У газов наоборот, плотность увеличивается с уменьшением проницаемости и увеличение нагрузки на прокладку не требуется. Во-вторых, повышение температуры вызывает расширение деталей соединения, что приводит к увеличению нагрузки на крепежные детали, которые охватывают фланцы и прокладку. В результате диаметр крепежных деталей надо увеличивать, повышая при этом материалоемкость, габариты и себестоимость фланцевого соединения.

Изменение нагрузки на прокладку и крепежные детали в связи с изменением температуры определяют согласно ГОСТу [2] по выражению

$$\Delta Q_t = \gamma\left[\left(\alpha_{ф1}h_1 + \alpha_{ш1}h_{ш1}\right)\left(t_{ф1} - 20\right) + \left(\alpha_{ф2}h_2 + \alpha_{ш2}h_{ш2}\right)\left(t_{ф2} - 20\right) - \alpha_б\left(h_1 + h_2\right)\left(t_б - 20\right)\right], \quad (2)$$

где α, t, h – коэффициент линейного расширения материала детали, град$^{-1}$, ее температура, °С, в рабочих условиях и расчетная толщина фланцев, м, соответственно; нижние индексы ф, ш, б – относятся соответственно к фланцам, шайбам, болтам; цифры относятся к деталям фланца 1 и фланца 2 соответственно.

Первые два члена правой части уравнения (2) относятся к охватываемым (сжатым) деталям, а третий член – к охватывающим (растянутым).

На рисунке 2 представлена схема теплового воздействия двух деталей – болта *1* и втулки *2*, изготовленных из материалов с различными коэффициентами линейного расширения: α_1 для болта и α_2 для втулки. Температуры этих деталей возрастают от t_0 до t_1 и t_2 соответственно. Удлинение их в свободном состоянии:

– для болта

$$\Delta l_1 = l\alpha_1\Delta t_1;$$

– для втулки

$$\Delta l_2 = l\alpha_2\Delta t_2,$$

где $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ и $\Delta t_2 = t_2 - t_0$; l – длина соединения, м.

При нагреве в каждой детали возникает температурная деформация Δl – изменение размеров тела в зависимости от изменения его температуры. В собранном и нагруженном усилием затяжки соединении возникает разность температурных деформаций этих деталей, определяемая по выражению

$$\Delta l_t = l\left(\alpha_2\Delta t_2 - \alpha_1\Delta t_1\right). \quad (3)$$

Соответственно относительная деформация

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_t}{l} = \left(\alpha_2\Delta t_2 - \alpha_1\Delta t_1\right). \quad (4)$$

Согласно закону Гука, относительное удлинение болта ε_1 и уменьшение втулки ε_2 возникает в результате термической нагрузки в соединении Q_t, Н,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{H} = \frac{Q_t}{FE}, \quad (5)$$

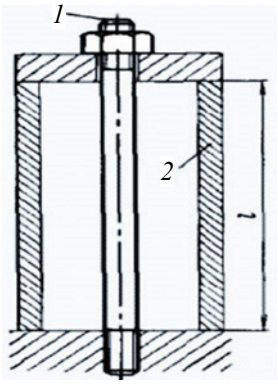


Рис. 2. Схема теплового воздействия двух деталей: *1* – болт; *2* – втулка

где σ – напряжение в материале, Н/м^2; E – модуль упругости материала, Н/м^2; F – площадь поперечного сечения детали, м^2.

Из (3) – (5) следует, что

$$\Delta l_t = \frac{Q_t l}{FE} = \lambda Q_t \,, \tag{6}$$

где $\lambda = l/(FE)$ – коэффициент осевой податливости детали, м/Н.

Из уравнений (3) и (6) при условии равенства температур нагрева деталей соединения

$$Q_t = \frac{l\,\Delta t(\alpha_2 - \alpha_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}\,. \tag{7}$$

Из анализа выражения (7) видно, что при повышении температуры возможно три варианта изменения нагрузки в соединении:

1) если $\alpha_1 > \alpha_2$ – уменьшается;

2) если $\alpha_1 = \alpha_2$ – не изменяется;

3) если $\alpha_1 < \alpha_2$ – увеличивается.

Первый вариант возможен при использовании материалов с резко отличающимися по значению коэффициентами термического расширения.

Если соединение состоит из одинаковых материалов с одинаковыми коэффициентами линейного термического расширения ($\alpha_1 = \alpha_2$), то термическая сила в таком соединении будет незначительной или отсутствовать. Это связано с тем, что при одинаковых коэффициентах термического расширения материалов они будут деформироваться одинаково при изменении температуры, что не вызовет значительных напряжений или сил в соединении.

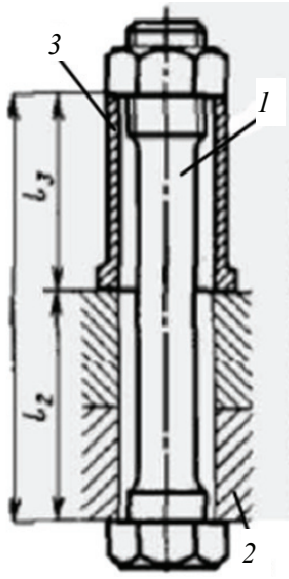


Рис. 3. Уменьшение термических напряжений в стяжных соединениях:
1 – шпильки; *2* – стягиваемые детали; 3 – втулки

Однако следует отметить, что даже при одинаковых материалах и коэффициентах термического расширения может возникнуть небольшая термическая сила из-за различий в геометрии или ограничениях перемещения компонентов соединения. Это может быть связано с неполнотой симметрии соединения или наличием других факторов, которые могут влиять на деформацию компонентов.

При наступлении третьего варианта возможны разные способы уменьшения термической силы (случай 3), например, уменьшение разности температур сопряженных деталей охлаждением стягиваемой детали или увеличением температуры стягивающей детали. Другой способ – уменьшение разницы в значениях коэффициентов линейного расширения соответствующим подбором материалов сопряженных деталей.

При известных материалах соединяемых деталей термическую силу можно уменьшить введением между ними втулок *1* (рис. 3) из материалов с меньшим коэффициентом линейного расширения.

Температурная деформация такого соединения

$$\Delta l_t = l_2\alpha_2\Delta t_2 + l_3\alpha_3\Delta t_3 - l_1\alpha_1\Delta t_1\,, \qquad (8)$$

где α_2, α_3, α_1 – коэффициенты термического расширения соответственно стягиваемых деталей, втулки и шпильки; t_2, t_3, t_1 и l_2, l_3, l_1 – соответственно их температуры, °С, и длины, м.

Приравнивая к нулю выражение (8) при $l_3 = l_1 - l_2$, равенстве температур этих деталей получаем условие отсутствия температурной нагрузки

$$l_3 = \frac{l_2\Delta t(\alpha_2 - \alpha_1)}{(\alpha_1 - \alpha_3)}\,. \qquad (9)$$

Однако даже в случае равенства коэффициентов линейного расширения деталей соединения, в случае принудительного фланцевого соединения с пластичной прокладкой необходимо рассматривать третий вариант, так как коэффициент термического расширения полимерной прокладки $\alpha_п$ больше, чем для фланцев и болта $\alpha_б$, охватывающих прокладку. При этом появляется дополнительная термическая нагрузка Q_t в том месте по длине болта, где расположена прокладка.

Экспериментальные исследования уплотнения с комбинированной прокладкой

Для компенсации термических нагрузок российскими учеными разработана конструкция соединения с комбинированной прокладкой, защищенная патентом на полезную модель РФ RU 154210 U1, которая представлена на рис. 4.

В данном фланцевом соединении уплотнение состоит из прокладки *2*, в которую по внешнему диаметру вставлено кольцо *3*. Материал кольца-вставки имеет коэффициент термического расширения ниже, чем материалы других деталей соединения, например, стекло.

В данном случае возникающая термическая нагрузка при равенстве температур определяется по выражению

$$Q_t = \frac{h\Delta t(\alpha_п - \alpha_б)}{\lambda_п + \lambda_б}\,, \qquad (10)$$

где h – высота части болта, равная высоте прокладки, индексы «п» и «б» относятся к прокладке и болту соответственно.

Чтобы $Q_t = 0$, необходимо равенство $\alpha_п = \alpha_б$, в этом случае

$$h(\alpha_п - \alpha_б) = 0 \text{ или } h\,\alpha_б = h\,\alpha_п.$$

Это возможно при использовании в прокладке кольца вставки высотой $h_в$ с низким коэффициентом термического расширения. Тогда величина [6]

$$h = h_б = h_п + h_в\,. \qquad (11)$$

Используя выражение (11), получим

$$(h_п + h_в)\alpha_б = h_п\alpha_п + h_в\alpha_в,$$

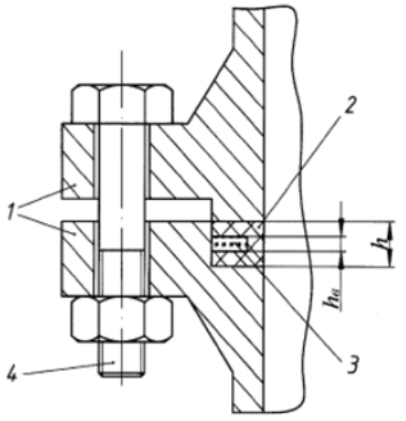


Рис. 4. Схема фланцевого соединения (патент РФRU 154210 U1):
1 – фланцы; *2* – прокладка; *3* – вставка; *4* – болт

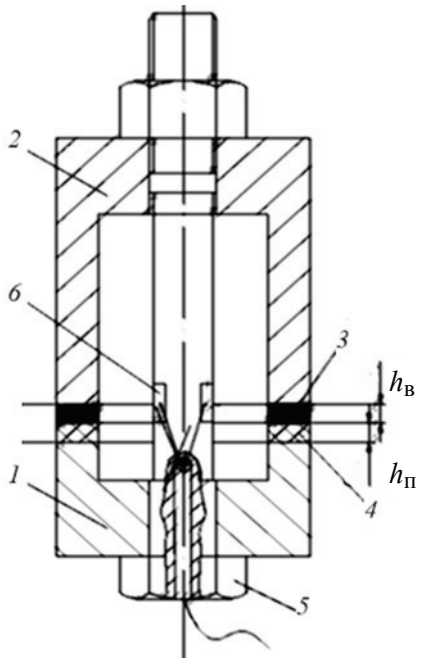


Рис. 5. Модель для исследования:
1, *2* – нижний и верхний стаканы;
3 – кольцо (материал – стекло);
4 – кольцо (материал – фторопласт-4);
5 – болт; *6* – тензодатчик

откуда

$$h_в = h_п \frac{\alpha_п - \alpha_б}{\alpha_б - \alpha_в}. \qquad (12)$$

Определив таким образом высоту вставки в прокладку, можно утверждать, что дополнительная термическая нагрузка, вызванная разными значениями коэффициентов термического расширения его деталей, будет стремиться к нулю.

Проведены серии экспериментов по определению увеличения термической нагрузки на болты фланцевого беспрокладочного соединения, с прокладкой из винипласта толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м и с комбинированной прокладкой с компенсирующим кольцом из простого стекла толщиной $14 \cdot 10^{-3}$ м, которая определялась по выражению (12).

На рисунке 5 представлена экспериментальная физическая модель фланцевого соединения.

С помощью динамометрического ключа создавался момент силы затяжки $M_з = 30$ Нм. При этом осевая сила, возникающая в стержне болта, – $Q_з = 4{,}4$ кН.

Модель устанавливалась в термошкаф, где постепенно повышалась температура от 0 до 150 °С. С помощью трех тензодатчиков (под углом 120°) через приемник и усилитель сигнал передавался на компьютер, и с помощью специальной программы (ZetLAb) получали и анализировали данные, строили зависимости увеличения нагрузки на болт с увеличением температуры.

Результаты экспериментов представлены на рис. 6.

Из результатов экспериментов следует:

1. В беспрокладочном соединении наблюдается рост термической силы, несмотря на примерно одинаковый материал деталей соединения, что, как сказано выше, возможно по указанным там же причинам.

2. Наличие прокладки из материала с термическим коэффициентом расширения, бо́льшим, чем его значение для остальных деталей соединения, определяет увеличение термической нагрузки на бо́льшую величину, чем в соединении без прокладки. В данном случае увеличение нагрузки составляет примерно 30 %, что более 10 %, при увеличении нагрузки на которые можно не учитывать в расчете согласно ГОСТ 4233.4–2017 [5].

3. Наличие компенсирующего кольца, выполненного из обычного стекла, снижает термическую нагрузку в соединении, почти полностью компенсируя ее. Расхождение составляет 7 – 8 % от значений нагрузки для беспрокладочного соединения, что находится в рамках ошибки эксперимента.

Из полученных результатов видно, что до 65 °С значения нагрузки несколько увеличены. На наш взгляд, это связано с выборкой неплотностей в соединении кольца и прокладки.

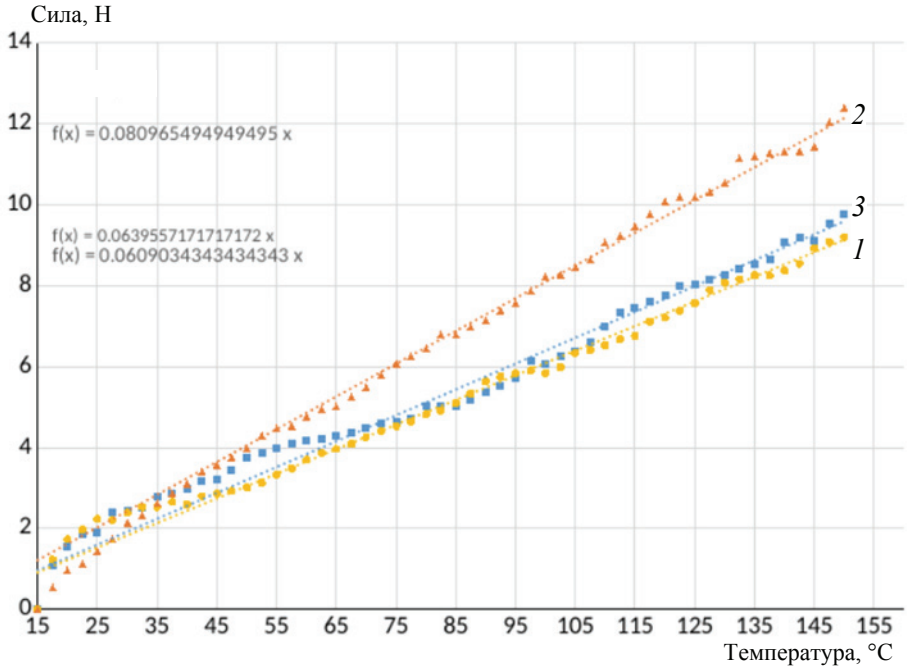


Рис. 6. Рост термической силы от температуры при заданном усилии затяжки соединений:
1 – беспрокладочное; *2* , *3* – с винипластовой и комбинированной прокладками соответственно

Заключение

Таким образом, использование кольца, выполненного из обычного стекла с коэффициентом термического расширения ниже, чем у стальных деталей соединения, параллельно с прокладкой ведет к компенсации дополнительной нагрузки, возникающей от работы пластичной прокладки и в идеале должно полностью компенсировать увеличение термической нагрузки, вызванной термическим расширением пластичной прокладки.

Проанализировав результаты исследований, отмечено, что материал компенсационного кольца необходимо подбирать с более низким коэффициентом термического расширения, что приводит к уменьшению высоты прокладочного узла. Такие материалы существуют, однако стоимость их достаточно высока.

Список литературы

1. Продан, В. Д. Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды : учеб. пособие / В. Д. Продан. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 280 с.

2. Фалько, А. Л. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств : конспект лекций / А. Л. Фалько, Д. В. Степанов. – Керчь : Изд-во ФГБОУ ВО КГМТУ, 2019. – 156 с.

3. Продан, В. Д. Герметичность оборудования : учеб. пособие / В. Д. Продан, Г. В. Божко. – М. : Университет машиностроения, 2014. – 109 с.

4. ГОСТ 34233.1–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – Введ. 2018-08-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 30 с.

5. ГОСТ 34233.4–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – Введ. 2018-08-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 42 с.

6. Божко, Г. В. Разъемные герметичные соединения / Г. В. Божко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 404 – 420.

The Impact of Elevated Temperature on Operation of Flange Joint with Polymer Gasket

G. V. Bozhko[1]✉, M. S. Fokina[2], A. S. Sokolov[3], A. S. Baskakov[1], I. V. Konovalov[1]

Department of Processes and Apparatuses of Chemical Engineering (1), hitema@npp-htm.ru; Center for Project Activities (2); Faculty of Chemical Engineering and Biotechnology (3); Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Keywords: deformation; coefficient of thermal expansion; fasteners; load; gasket; temperature; flange joint.

Abstract: When flange joints operate at a temperature, additional thermal loads arise, which can lead to depressurization of the joint. The impact of temperature on the operation of the joint and the possibility of compensating for temperature loads are analyzed. It is proposed to use seal designs with a compensation ring, the coefficient of thermal expansion of which is lower than that of other parts of the joint. Theoretical and experimental studies with a vinyl plastic gasket are conducted. A physical model of a flange joint and a research setup are created to conduct experiments. The results and conclusions on the work are presented, which confirm the correctness of the assumptions on the operation of the new seal design.

References

1. Prodan V.D. *Germetichnost' raz"yemnykh soyedineniy oborudovaniya, ekspluatiruyemogo pod davleniyem rabochey sredy: ucheb. posobiye* [Tightness of detachable joints of equipment operated under pressure of the working environment: textbook], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2012, 280 p. (In Russ.)

2. Fal'ko A.L., Stepanov D.V. *Raschet i konstruirovaniye mashin i apparatov pishchevykh proizvodstv: konspekt lektsiy* [Calculation and design of machines and equipment for food production: lecture notes], Kerch': Izdatel'stvo KGMTU, 2019, 156 p. (In Russ.)

3. Prodan V.D., Bozhko G.V. *Germetichnost' oborudovaniya: ucheb. posobiye* [Tightness of equipment: textbook], Moscow: Universitet mashinostroyeniya, 2014, 109 p. (In Russ.)

4. GOST 34233.1-2017. *Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Obshchiye trebovaniya* [Vessels and apparatuses. Strength calculation standards and methods. General requirements], Moscow: Standartinform, 2019, 30 p. (In Russ.)

5. GOST 34233.4-2017. *Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet na prochnost' i germetichnost' flantsevykh soyedineniy* [Vessels and apparatuses. Strength calculation standards and methods. Strength and tightness calculation of flange joints], Moscow: Standartinform, 2019, 42 p. (In Russ.)

6. Bozhko G.V. [Detachable tight joints], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 404-420. (In Russ., abstract in Eng.)

Auswirkung von erhöhter Temperatur auf die Leistung der Flanschverbindung mit Polymerdichtung

Zusammenfassung: Beim Betrieb von Flanschverbindungen unter Temperatur treten zusätzliche thermische Belastungen auf, die zu einem Druckabfall in der Verbindung führen können. Der Einfluss der Temperatur auf den Betrieb der Verbindung und die Möglichkeit der Kompensation der thermischen Belastungen ist analysiert. Es ist vorgeschlagen, Dichtungskonstruktionen mit einem Ausgleichsring zu verwenden, dessen Wärmeausdehnungskoeffizient niedriger als der Koeffizient anderer Teile der Verbindung ist. Es sind theoretische und experimentelle Studien mit einer Vinyl-Kunststoffdichtung durchgeführt. Für die Experimente sind ein physikalisches Modell der Flanschverbindung und ein Forschungsaufbau erstellt. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit sind vorgestellt, sie bestätigen die Richtigkeit der Annahmen über die Funktionsweise der neuen Dichtungskonstruktion.

Influence de la température élevée sur le fonctionnement de la connexion à bride avec un joint en polymère

Résumé: Lors du fonctionnement des raccords à bride, des charges thermiques supplémentaires peuvent se produire à la température, ce qui peut entraîner une étanchéité de la connexion. Sont analysés l'effet de la température sur le fonctionnement de la connexion et la possibilité de compenser les charges de température. Est proposé d'utiliser des joints à bague compensatrice dont le coefficient de dilatation thermique est inférieur à celui des autres pièces de raccordement. Sont menées des études théoriques et expérimentales avec un joint en vinyle. Pour mener des expériences, un modèle physique de connexion à bride et une installation d'étude sont créés. Sont présentés les résultats et les conclusions du travail, ce qui confirme la validité des hypothèses sur le fonctionnement de la nouvelle conception du joint.

Авторы: ***Божко Григорий Вячеславович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; ***Фокина Мария Сергеевна*** – кандидат технических наук, доцент Центра проектной деятельности; ***Соколов Андрей Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент, декан факультета химической технологии и биотехнологии; ***Баскаков Антон Павлович*** – ведущий инженер кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; ***Коновалов Иван Владимирович*** – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия.

УДК 621.365.9:669.179
DOI: 10.17277/vestnik.2025.02.pp.344-356

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ НА ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДИФФУЗИИ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

Д. Е. Капуткин[1]✉, Н. А. Капуткина[2]

Кафедра физики (1), kaputkin@mail.ru; ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Москва, Россия; кафедра «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» (2), ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Ключевые слова: диффузия; поверхность; покрытие; разряд; электролитная плазма.

Аннотация: Электролитно-плазменная обработка ускоряет насыщение обрабатываемой поверхности стали одним или несколькими элементами (N, C, B, W, V, Mo, Ti) в 10 – 1000 раз по сравнению с обычной химико-термической обработкой из газовой фазы. Предложена и обоснована модель, объясняющая данный процесс роста толщины диффузионного слоя, учитывающая ускоренное движение бомбардирующих ионов, а также неоднородность и нестационарность распределения температуры под поверхностью обрабатываемого материала, вызванную протеканием электрических разрядов. Показано, что причиной ускорения насыщения поверхности являются повышение концентрации насыщающих элементов на обрабатываемой поверхности, локальное повышение температуры, появление механических напряжений, а также существенное снижение энергии активации диффузии.

Введение

В процессе эксплуатации металлических изделий, узлов и деталей во многих случаях решающими характеристиками являются свойства поверхности: твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, коэффициент трения, шероховатость и т.п. Модификацию поверхности проводят различными способами: воздействием концентрированных потоков энергии (индукционной, лазерной, плазменной, электронно-лучевой, световой и другими видами обработки), поверхностной механической обработкой (роликовой, пескоструйной, дробеструйной и т.п.). Одним из основных способов повышения функциональных характеристик поверхности материала является ее насыщение инородными атомами – химико-термическая обработка (**ХТО**). Обычно такие атомы попадают на поверхность обрабатываемого материала из газовой (реже – жидкой или твердой) фазы, после чего диффундируют вглубь, создавая слои необходимой толщины. Скорость диффузионных процессов определяется в первую очередь температурой, однако чрезмерный нагрев может приводить к недопустимому изменению структуры основного металла. Поэтому обычная химико-термическая обработка требует довольно много времени и, соответственно, затрат энергии, бóльшая часть которой затрачивается непроизводительно, поскольку идет на прогрев внутренних зон обрабатываемого материала.

В современных условиях все активнее используются различные способы многократного ускорения ХТО, например, посредством пропускания через рабочую атмосферу электрических разрядов [1] (так называемая электро-химико-термическая обработка), одним из вариантов которой является химико-термическая обработка металлов в электролитной плазме при анодном и катодном процессах [2, 3]. Деталь при электролитно-плазменной обработке (**ЭПО**) служит активным электродом, ее площадь значительно меньше площади второго электрода, в роли которого часто выступают стенки и дно сосуда, а разность потенциалов составляет 100…600 В [4]. В таких условиях вокруг обрабатываемой детали начинается интенсивное газовыделение за счет электролиза и закипания раствора. При достаточно высоком напряжении пузырьки пара, возникающие при кипении, сливаются в тонкую парогазовую оболочку (**ПГО**), в которой наблюдаются микроразряды. Экспериментально определенная толщина ПГО для анодного процесса составляет 0,1…0,6 мм [2, 3], а для катодного – 0,2…1,2 мм [5, 6].

Цель работы – анализ процессов, обеспечивающих ускорение насыщения поверхности изделий легирующими элементами при электролитно-плазменной обработке по сравнению с обычной ХТО из газовой фазы.

Условия химико-термической обработки в электролитной плазме

Парогазовая оболочка состоит из паров воды, активированных OH^-, H^+ и ионов, входящих в состав электролита (рис. 1) [7]. На парогазовой оболочке происходит основное падение напряжения в цепи, поэтому ее свойства определяют нелинейные участки вольт-амперной характеристики процесса ЭПО. Ионизация водяного пара, а также эмиссия ионов из электролита делает возможным образование электролитной плазмы и поддержание электрического разряда. Традиционным

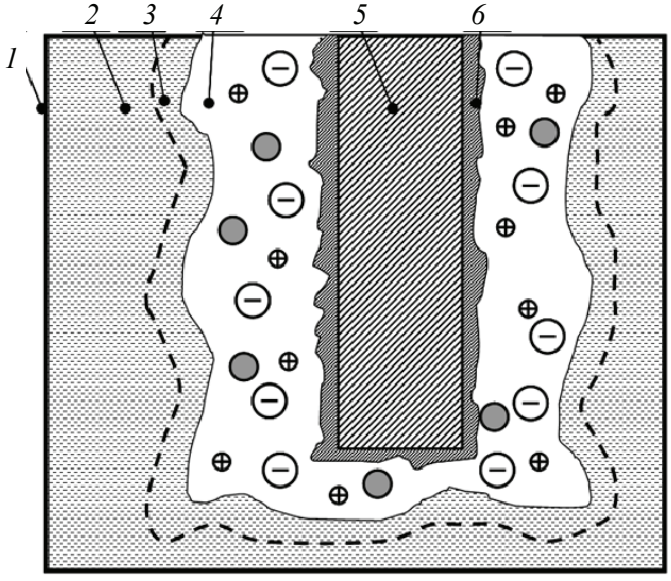


Рис. 1. Схема приэлектродной зоны в режиме нагрева при электролитно-плазменной обработке:
1 – корпус электролитной ячейки, часто используемый как неактивный электрод; *2* – электролит, в котором можно выделить перегретый слой *3*; *4* – парогазовая оболочка, где движутся нейтральные молекулы (●), а также положительно (⊕) и отрицательно (⊖) заряженные ионы; *5* – металлический активный электрод; *6* – возможный неметаллический слой на поверхности активного электрода

и наиболее распространенным способом ХТО поверхности стали в электролитной плазме является насыщение поверхности стальных изделий легкими элементами: азотирование, цементация, борирование [8, 9], насыщение поверхности стальных изделий одновременно несколькими элементами (нитроцементация, сульфонитроцементация). При всех вариантах электролитно-плазменной ХТО температура обрабатываемой поверхности составляет 750…1100 °С.

Насыщение поверхности карбидообразующими элементами, такими как вольфрам [10], ванадий [11], молибден [12], или одновременно молибденом и ванадием [13], молибденом и титаном [14] дает возможность расширить комплекс получаемых свойств поверхности стальных изделий. Важно, что процессы, протекающие в электролитной плазме, во многом аналогичны процессам, проходящим при других видах электро-химико-термической обработки.

Оценка энергии насыщающих ионов в газовой фазе вблизи активного электрода

Существует много различных способов проведения химико-термической обработки, при которых вокруг поверхности обрабатываемого металла в газовой среде возбуждается электрический разряд, – это и обработка в тлеющем разряде при пониженном давлении [1], и микродуговая химико-термическая обработка [15], проводимая в контейнере с порошками угля (для цементации) и, при необходимости, другими насыщающими элементами, в том числе, например, бором и такими металлами, как хром, молибден [16], вольфрам [17], ванадий [18], и электролитно-плазменная обработка, где разряды возбуждаются в ПГО, формирующейся вокруг активного электрода. Во всех этих случаях насыщение поверхности обрабатываемого материала происходит гораздо (в десятки и сотни раз) быстрее, чем при классической ХТО в неэлектризуемой газовой среде. Например, ионно-плазменное азотирование стали AISI-420 (российский аналог – сталь 40Х13) в течение 1 ч дает такую же глубину упрочненного слоя, как и 25 ч газового азотирования. При этом качество поверхностных слоев получается не хуже [19]. Другой пример: в результате электролитно-плазменного азотирования при катодном процессе в течение 10 мин износостойкость стали SACM1 (российский аналог – сталь 10) на 10 – 15 % выше, чем после газового азотирования в течение 24 ч [20].

Инородный атом при ХТО, чтобы занять свое место на определенной глубине под обрабатываемой поверхностью, участвует в нескольких процессах:

1) попадание в газовую фазу в составе молекулы (не обязательно);
2) ионизация (не обязательно);
3) перемещение к обрабатываемой поверхности;
4) осаждение на обрабатываемую поверхность (адсорбция);
5) диссоциация;
6) проникновение в поверхность (абсорбция);
7) диффузия вглубь насыщаемого материала.

При классической ХТО ионизация не требуется, а наличие насыщающих элементов в газовой фазе обеспечивается использованием атмосферы соответствующего состава.

На каждый ион, содержащий насыщающие элементы, электрическое поле действует с силой $F = zeE$, где z – зарядовое число (валентность) иона; e – элементарный заряд; E – напряженность электрического поля, В/м. При электролитно-плазменной обработке напряженность электрического поля в ПГО достигает $10^6…10^7$ В/м [21]. В результате ион приобретает дополнительную (к тепловой) кинетическую энергию $W_0 = F\lambda$, где λ – длина свободного пробега иона в газовой

фазе, $\lambda = \dfrac{1}{\sqrt{2}\sigma n}$, где σ – эффективное сечение рассеяния ионов на тормозящих электронейтральных молекулах; n – концентрация этих молекул. Степень ионизации низкотемпературной плазмы не превышает $10^{-6}\ldots10^{-4}$ [22], и n практически равна концентрации всех молекул газа. Величина $\sigma = \pi\,(r_0 + r_i)^2$, где r_0 – радиус тормозящих молекул газа (например, $r_{H_2O} = 1{,}5\cdot10^{-10}$ м, $r_{O_2} = 1{,}5\cdot10^{-10}$ м, $r_{N_2} = 1{,}6\cdot10^{-10}$ м); r_i – радиус иона, который обычно несколько увеличивается с количеством атомов (например, $r_{OH^-} = 1{,}3\cdot10^{-10}$ м, $r_{SO_4^{2-}} = 2{,}3\cdot10^{-10}$ м), уменьшается с ростом заряда для катионов (например, $r_{Fe^-} = 0{,}83\cdot10^{-10}$ м, $r_{Fe^{2+}} = 0{,}75\cdot10^{-10}$ м, $r_{Fe^{3+}} = 0{,}67\cdot10^{-10}$ м) и увеличивается с ростом заряда у анионов (например, $r_{Cl^-} = 1{,}81\cdot10^{-10}$ м, $r_{S^{2-}} = 1{,}90\cdot10^{-10}$ м). При этом $n = p/k_BT$, где p – давление (при ЭПО $p \approx 10^5$ Па); $k_B = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К – константа Больцмана; T – температура газовой фазы, которая вблизи обрабатываемой поверхности может быть принята примерно равной температуре этой поверхности, то есть $T = (1{,}0\ldots1{,}3)\cdot10^3$ К. То есть, на одной длине свободного пробега ион приобретает дополнительную энергию $W_0 = (5\ldots8)\cdot10^{-19}$ Дж = 3…5 эВ.

Для «тяжелых» ионов, масса которых существенно больше массы основы газовой атмосферы, необходимо также учитывать еще один факт, который не был учтен, например, в [23]. При каждом столкновении «тяжелый» ион теряет не всю дополнительную энергию. Если обозначить отношение масс иона и основных молекул атмосферы α, то после многократных абсолютно упругих столкновений энергия иона возрастает в $\beta = \dfrac{(\alpha+1)^2}{4\alpha}$ раз [24], то есть энергия «тяжелых» ионов может достигать $W_0 = (10\ldots20)\cdot10^{-19}$ Дж = 7…15 эВ.

С учетом соотношения $W_0 = k_BT_{eff}$ оказывается, что при наличии электрического поля ионы подлетают с эффективной температурой $T_{eff} = 4000\ldots15000$ К. Гигантское увеличение скорости и, соответственно, энергии и эффективной температуры ионов в каналах искровых (при активном электроде – аноде) или микродуговых (при активном электроде – катоде) разрядов, естественно, также имеет место.

При этом важно, что с такой дополнительной энергией ион движется практически перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Поэтому ускоряется не только процесс перемещения к обрабатываемой поверхности, но и процессы адсорбции, диссоциации и абсорбции.

При проведении, например, процесса молибденирования стали при анодном процессе [12 – 14], исходя из физических особенностей режима нагрева анодного процесса, выбрана 12-молибдофосфорная гетерополикислота $[H_3PMo_{12}O_{40}]\cdot nH_2O$, где n – до 32 молекул воды. Данная кислота является сильным электролитом и в водном растворе диссоциирует по схеме:

$$[H_3PMo_{12}O_{40}] \rightarrow 3H^+ + P[Mo_{12}O_{40}]^{3-}.$$

Энергия ионов $P[Mo_{12}O_{40}]^{3-}$, бомбардирующих поверхность анода, при этом соответствует температуре $T_{eff} \sim 10^4$ К.

При диффузионном насыщении активного электрода молибденом [12], ванадием [11], вольфрамом [10] и другими металлами в водных растворах, содержащих гетерополикислоты, создаются условия, когда скорость подвода активных элементов к поверхности образца намного превосходит скорость их диффузии, приводя к образованию поверхностного слоя на активном электроде. Это обусловливает протекание процесса диффузионного насыщения не из газовой фазы, как при азотировании или науглероживании, а из нарастающего поверхностного слоя.

Если сравнить результаты молибденирования углеродистой стали из расплава Na_2MoO_4, где после 4 ч обработки при 950 °С толщина насыщенного слоя составляла 30 мкм, и при использовании электролитно-плазменной обработки в режиме нагрева анодного процесса (табл. 1), то оказывается, что скорость насыщения поверхности увеличивается как минимум на 2 порядка [25]. Аналогичные результаты получаются при сравнении скоростей электролизного и электролитно-плазменного вольфрамирования (табл. 2) [26].

Существенное увеличение скорости ионов под действием электрического поля в газовой фазе не может значимо повлиять на движение насыщающего элемента внутри обрабатываемого материала, так как вся дополнительная энергия рассеивается на глубинах в единицы атомных слоев. При этом скорость диффузии при воздействии газовых электроразрядов в десятки раз выше, чем при классической ХТО, и это относится к диффузии как элементов внедрения [27, 28], так и замещения [29, 30].

Протекание газовых разрядов вблизи обрабатываемой поверхности крайне неоднородно по пространству и нестационарно по времени. На фоне тлеющего или таунсендовского разряда постоянно возникают, перемещаются и исчезают каналы искровых (при анодном процессе) или микродуговых (при катодном процессе) разрядов, что вызывает локальное резкое изменение температуры поверхности. Кроме того, упомянутая нестационарность разрядов приводит к быстрым локальным изменениям плотности тока внутри обрабатываемого материала, а в дальнейшем к резким локальным изменениям температуры уже на некотором расстоянии от поверхности. Такое неоднородное и нестационарное температурное поле приводит к возникновению переменных по знаку и времени внутренних напряжений (эффект Н. В. Гевелинга [31, 32], выявленный при исследовании электропластической деформации в 1930-е годы), которые резко увеличивают скорость диффузии [33, 34] снижая ее энергию активации [32, 35, 36].

Таблица 1

Глубина слоя, насыщенного молибденом при температуре химико-термической обработки 950 °С

Вид ХТО	Состав электролита, масс. %				Плотность тока, кА/м^2	Время обработки, мин	Глубина насыщенного слоя, мкм
	Na_2MoO_4	$[H_3PMo_{12}O_{40}]\cdot nH_2O$	HCl	H_2O			
Электролизное насыщение из расплава	100	–	–	–	2…3	240	30
ЭПО	–	2	3	95	6…7	10	90
		6,6	10	83,4			340
		10	15	75			280

Таблица 2

Глубина слоя, насыщенного вольфрамом при химико-термической обработке

Вид ХТО	Состав электролита, масс. %				Температура, °С		Плотность тока, кА/м^2	Напряжение, В	Время обработки, мин	Глубина насыщенного слоя, мкм
	Na_2WO_4	$[H_3PW_{12}O_{40}]\cdot nH_2O$	HCl	H_2O	анода	электролита				
Электролизное насыщение из расплава	100	–	–	–	1000		2…3		360	20
ЭПО	–	8	10	82	850	22	9	170	4,5	150
					900		7	220		200
					950		6	240		280
					1050	25	4	280		350
					950		6	240	3	220
					950				6	300
					950				9	340
		2	5	93	950				4	120
		10	15	75	950		7		4	260

Известно, что аналогичные эффекты имеют место при воздействии ультразвука [37, 38] или лазерного нагрева [39, 40], импульсном нагружении [41], а также при наличии внутренних микронапряжений, вызванных дефектами решетки [42] или фазовыми превращениями [43, 44].

Заключение

Предложена модель, объясняющая ускоренный рост толщины диффузионного слоя при электролитно-плазменной обработке по сравнению с газовой химико-термической обработкой, учитывающая ускоренное движение бомбардирующих ионов, а также неоднородность и нестационарность распределения температуры под поверхностью обрабатываемого материала, вызванную протеканием электрических разрядов. В результате повышается концентрация насыщающих элементов на обрабатываемой поверхности, локально повышается температура, а также существенно снижается энергия активации диффузии.

Список литературы

1. Лахтин, Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.

2. Дураджи, В. Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, А. С. Парсаданян. – Кишинев : Штиинца, 1988. – 216 с.

3. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 1 / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд [и др.]. – М. : Техносфера. 2011. – 464 с.

4. Kaputkin, D. E. Plasma electrolytic processing of bimetals at the anodic process / D. E. Kaputkin, V. N. Duradji, N. A. Kaputkina // Letters on Materials. – 2021. – Vol. 11, No. 4. – P. 433 – 437. doi: 10.22226/2410-3535-2021-4-433-437

5. Ганчар, В. И. Анодное растворение железа в процессе электролитного нагрева / В. И. Ганчар, И. М. Згардан, А. И. Дикусар // Электронная обработка материалов. – 1994. – № 4. – С. 69 – 77.

6. Шемагин, И. А. Определение границы устойчивости ламинарного течения пара при пленочном кипении / И. А. Шемагин, Р. М. Лапшин // Известия вузов. Энергетика. – 1977. – № 1. – С. 92 – 97.

7. Капуткин, Д. Е. Ускоренное диффузионное насыщение поверхности металлов при электро-химико-термической обработке / Д. Е. Капуткин, В. Н. Дураджи, Н. А. Капуткина // Физика и химия обработки материалов. – 2020. – № 2. – С. 48 – 57. doi: 10.30791/0015-3214-2020-2-48-57

8. Кузенков, С. Е. Борирование стали 45 в электролитной плазме / С. Е. Кузенков, Б. П. Саушкин // Электронная обработка материалов. – 1996. – № 4-6. – С. 24 – 28.

9. Плеханов, Г. В. Разработка электротехнологии борирования сельскохозяйственного инструмента / Г. В. Плеханов, Г. О. Синицына // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 98 – 103.

10. Дураджи, В. Н. О диффузии вольфрама в сталь при нагреве в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, Н. А. Полотебнова // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 1. – С. 35 – 37.

11. О фазовом составе поверхности металлов, обработанных в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, Н. Н. Морарь, Н. А. Полотебнова, Л. В. Кисеева // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 1. – С. 49 – 52.

12. Полотебнова, Н. А. О диффузионном насыщении стали молибденом при нагреве в электролитной плазме / Н. А. Полотебнова, В. Н. Дураджи // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 5. – С. 90 – 92.

13. Дураджи, В. Н. О многокомпонентном насыщении стали при нагреве в электролитной плазме. Молибдованадирование, I / В. Н. Дураджи // Электронная обработка материалов. – 1995. – № 2. – С. 41 – 44.

14. Дураджи, В. Н. О многокомпонентном насыщении стали при нагреве в электролитной плазме. Молибдотитанирование, II / В. Н. Дураджи // Электронная обработка материалов. – 1995. – № 2. – С. 44 – 46.

15. Степанов, М. С. Диффузионное насыщение углеродистой стали в режиме микродугового нагрева / М. С. Степанов, Ю. М. Домбровский, В. Н. Пустовойт // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – № 1(739). – С. 54 – 57.

16. Степанов, М. С. Структура, фазовый состав и свойства стали после микродугового борохромирования и боромолибденирования / М. С. Степанов, Л. В. Давидян, Ю. М. Домбровский // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – Т. 213, № 3. – С. 124 – 131.

17. Степанов, М. С. Создание покрытий карбидного типа при микродуговом термодиффузионном вольфрамировании стали / М. С. Степанов, С. М. Домбровский // Материаловедение. – 2018. – № 1. – С. 20 – 25.

18. Степанов, М. С. Оценка механических свойств и природа упрочнения диффузионного слоя при микродуговом ванадировании стали / М. С. Степанов, Ю. М, Домбровский, Л. В. Давидян // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 8. – С. 625 – 630.

19. Богачев, И. И. Анализ современных методов увеличения глубины азотированного слоя в сталях / И. И. Богачев, В. Н. Климов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 2(37). – С. 57 – 61.

20. Иосинори, Т. Химико-термическая обработка в электролите / Т. Иосинори // Кикайгидзюцу. – 1977. – Т. 25, № 8. – С. 118 – 119.

21. Воленко, А. П. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий / А. П. Воленко, О. В. Бойченко, Н. В. Чиркунова // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 4. – С. 144 – 147.

22. Кузенов, В. В. Сравнение термодинамических свойств ионизированных газов по моделям Томаса-Ферми и Саха в области их совместной применимости / В. В. Кузенов, В. В. Шумаев // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2014. – Т. 15, № 5. – С. 1 – 8.

23. Капцов, Н. А. Электрические явления в газах и вакууме / Н. А. Капцов. – М., Л. : Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1947. – 810 с.

24. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 516 с.

25. Состав для молибденирования стальных изделий. Авторское свидетельство SU 937534 A1, 23.06.1982. / В. Н. Дураджи, Н. А. Полотебнова, А. К. Товарков. – Заявка № 3005591 от 18.11.1980.

26. Способ вольфрамирования стальных изделий и состав для его осуществления. Авторское свидетельство SU 834238 A1, 30.05.1981. / В. Н. Дураджи, Н. А. Полотебнова, И. В. Брянцев. – Заявка № 2833682 от 26.10.1979.

27. Попов, А. А. Теоретические основы химико-термической обработки стали / А. А. Попов. – Свердловск : Свердловское Сред.-Урал. кн. изд-во, 1962. – 119 с.

28. Материаловедение : учеб. для высших технических учебных заведений / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 384 с.

29. Криштал, М. А. Механизм диффузии в железных сплавах / М. А. Криштал. – М. : Металлургия, 1972. – 400 с.

30. Кидин, И. Н. Электро-химико-термическая обработка металлов и сплавов / И. Н. Кидин, В. И. Андрюшечкин, В. А. Волков. – М. : Металлургия, 1978. – 320 с.

31. Гевелинг, Н. В. Поверхностная электротермообработка / Н. В. Гевелинг. – М. : ОНТИ, 1936. – 135 с.

32. Спектор, А. Г. О существовании эффекта Гевелинга / А. Г. Спектор // ЖТФ. – 1951. – Т. 21, вып. 10. – С. 1153 – 1156.

33. Гудцов, Н. Т. Ускорение цементации путем использования электрического тока / Н. Т. Гудцов, И. А. Сумин // Металлург. – 1937. – № 4. – С. 55 – 58.

34. Андрюшечкин, В. И. Основные закономерности, наблюдаемые при электро-химико-термической обработке металлов и сплавов / В. И. Андрюшечкин // Прогрессивные методы химико-термической обработки. – М. : Машиностроение, 1979. – С. 128 – 132.

35. Бокштейн, Б. С. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах / Б. С. Бокштейн, С. З. Бокштейн, А. А. Жуховицкий. – М. : Металлургия, 1974. – 280 с.

36. Влияние постоянного тока на скорость цементации стали / Д. Ф. Калинович, И. И. Ковенский, М. Д. Смолин [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1964. – № 12. – С. 46 – 47.

37. Александров, В. А. Формирование поверхностного слоя методом комплексного ультразвукового воздействия и азотирования / В. А. Александров, В. Ф. Казанцев, Д. С. Фатюхин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 3. – С. 33 – 36.

38. Кулемин, А. В. Диффузия углерода в железе при ультразвуковом воздействии / А. В. Кулемин, В. М. Голиков, В. А. Лазарев // Физика металлов и металловедение. – 1973. – Т. 36, № 4. – С. 785 – 789.

39. Сафронов, И. С. Параметрические характеристики нано- и микропор, влияющие на их залечивание при селективной лазерной обработке / И. С. Сафронов, А. И. Ушаков, О. В. Андрухова // Прикладная математика & Физика. – 2024. – Т. 56, № 3. – С. 226 – 233. doi: 10.52575/2687-0959-2024-56-3-226-233

40. Ушаков, И. В. Физика залечивания нанопор в конденсированном веществе в условиях воздействия лазерного излучения и высокотемпературной плазмы / И. В. Ушаков, И. С. Сафронов, А. Д. Ошоров // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2024. – Т. 62, № 1. – С. 7 – 18. doi: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18

41. Лариков, Л. Н. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко // Доклады Академии Наук СССР. – 1975. – Т. 221, № 4. – С. 1073 – 1075.

42. Штремель, М. А. Роль вакансий в распаде мартенсита / М. А. Штремель, Д. Е. Капуткин // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 12. – С. 174 – 177.

43. Капуткин, Д. Е. Взаимосвязь термокинетических параметров диффузионного распада и энергии активации диффузии в сталях и цветных сплавах / Д. Е. Капуткин // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т. 99, № 4. – С. 1 – 5.

44. Kaputkin, D. E. Transformation of retained austenite during tempering of high carbon steel / D. E. Kaputkin, L. M. Kaputkina, S. D. Prokoshkin // Journal de Physique IV. – 2003. – Vol. 112. – P. 275 – 278. doi: 10.1051/jp4:2003882

The Influence of Electric Discharges on Increasing the Diffusion Rate in Electrolytic-Plasma Treatment of Metals

D. E. Kaputkin[1]✉, N. A. Kaputkina[2]

Department of Physics (1), kaputkin@mail.ru;
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Department of Advanced Materials and Technologies for Aerospace Applications (2),
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Keywords: diffusion; surface; coating; discharge; electrolyte plasma.

Abstract: Electrolytic-plasma treatment accelerates the saturation of the treated steel surface with one or several elements (N, C, B, W, V, Mo, Ti) by 10 – 1000 times compared to conventional chemical-thermal treatment from the gas phase. A model explaining this process of growth of the diffusion layer thickness is proposed and substantiated, taking into account the accelerated movement of bombarding ions, as well as the heterogeneity and non-stationarity of the temperature distribution under the surface of the treated material caused by the flow of electric discharges. It is shown that the acceleration of surface saturation is caused by an increase in the concentration of saturating elements on the treated surface, a local increase in temperature, the appearance of alternating mechanical stresses, and a significant decrease in the activation energy of diffusion.

References

1. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D. *Azotirovaniye stali* [Nitriding of steel], Moscow: Mashinostroyeniye, 1976, 312 p. (In Russ.)

2. Duradji V.N., Parsadanyan A.S. *Nagrev metallov v elektrolitnoy plazme* [Heating of metals in electrolytic plasma], Kishinev: Shtiintsa, 1988, 216 p. (In Russ.)

3. Suminov I.V., Belkin P.N., Epel'fel'd A.V., [et al.] *Plazmenno-elektroliticheskoye modifitsirovaniye poverkhnosti metallov i splavov. Vol. 1* [Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys. Vol. 1]. Moscow: Tekhnosfera, 2011, 464 p. (In Russ.)

4. Kaputkin D.E., Duradji V.N., Kaputkina N.A. Plasma electrolytic processing of bimetals at the anodic process, *Letters on Materials*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 433-437. doi: 10.22226/2410-3535-2021-4-433-437 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Ganchar V.I., Zgardan I.M., Dikusar A.I. [Anodic dissolution of iron in the process of electrolytic heating], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials], 1994, no. 4, pp. 69-77. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Shemagin I.A., Lapshin R.M. [Determination of the stability boundary of laminar steam flow during film boiling], *Izvestiya vuzov. Energetika* [News of universities. Power engineering], 1977, no. 1, pp. 92-97. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Kaputkin D.E., Duradji V.N., Kaputkina N.A. [Accelerated diffusion saturation of metal surfaces during electro-chemical-thermal treatment], *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials processing], 2020, no. 2, pp. 48-57. doi: 10.30791/0015-3214-2020-2-48-57 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Kuzenkov S.E., Saushkin B.P. [Boriding of steel 45 in electrolytic plasma], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials], 1996, no. 4-6, pp. 24-28. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Plekhanov G.V., Sinitsyna G.O. [Development of electrotechnology for borating agricultural tools], *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov's Gerald], 2011, no. 2/2, pp. 98-103. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Duradji V.N., Polotebnova N.A. [On the diffusion of tungsten into steel during heating in electrolytic plasma], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials], 1984, no. 1, pp. 35-37. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Duradji V.N., Morar N.N., Polotebnova N.A., Kiseeva L.V. [On the phase composition of the surface of metals processed in electrolytic plasma], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 1986, no. 1, pp. 49-52. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Polotebnova N.A., Duradji V.N. [On diffusion saturation of steel with molybdenum during heating in electrolytic plasma], *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 1985, no. 5, pp. 90-92. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Duradji V.N. [On multicomponent saturation of steel during heating in electrolytic plasma. Molybdovanading, I], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials], 1995, no. 2, pp. 41-44. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Duradji V.N. [On multicomponent saturation of steel during heating in electrolytic plasma. Molybdotitanizing, II], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials], 1995, no. 2, pp. 44-46. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M., Pustovoit V.N. [Diffusion saturation of carbon steel under microarc heating], *Metal science and heat treatment of metals* [Metal science and heat treatment of metals], 2017, vol. 59, no. 1-2, pp. 55-58. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Stepanov M.S., Davidyan L.V., Dombrovsky Yu.M. [Structure, phase composition and properties of steel after micro-arc borochromation and boromolybdenation], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2018, no. 3(213), pp. 124-131. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Stepanov M.S., Dombrovsky Yu.M. [Development of carbide-type coatings during microarc thermal diffusion tungstening of steel], *Materialovedeniye* [Materials Science], 2018, no. 1, pp. 20-25. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Stepanov M.S., Dombrovsky Yu.M., Davidyan L.V. [Evaluation of mechanical properties and the nature of strengthening of the diffusion layer during microarc vanadization of steel], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 2018, vol. 61, no. 8, pp. 625-630. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Bogachev I.I., Klimov V.N. [Analysis of modern methods for increasing the depth of the nitrided layer in steels], *Vestnik MGTU «Stankin»* [Bulletin of MSTU "Stankin"], 2016, no. 2(37), pp. 57-61. (In Russ., abstract in Eng.)

20. Yoshinori T. [Thermochemical treatment in electrolyte], *Kikaigijutsu*, 1977, vol. 25, no. 8, pp. 118-119. (In Russ., abstract in Eng.)

21. Volenko A. P., Boychenko O. V., Chirkunova N. V. [Electrolytic-plasma treatment of metal products], *Vektor nauki TGU* [Vector of Science TSU], 2012, no. 4, pp. 144-147. (In Russ., abstract in Eng.)

22. Kuzenov V.V., Shumaev V.V. [Comparison of thermodynamic properties of ionized gases according to the Thomas-Fermi and Saha models in the field of their joint applicability], *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physicochemical kinetics in gas dynamics], 2014, vol. 15, no. 5, pp. 1-8. (In Russ., abstract in Eng.)

23. Kaptsov N.A. *Elektricheskiye yavleniya v gazakh i vakuume* [Electrical phenomena in gases and vacuum], Moscow, Leningrad: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1947, 810 p. (In Russ.)

24. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge], Moscow: Nauka, 1992, 516 p. (In Russ.)

25. Duradji V.N., Polotebnova N.A., Tovarkov A.K. *Sostav dlya molibdenirovaniya stal'nykh izdeliy* [Composition for molybdenum coating of steel products]. Author's certificate SU 937534 A1, 23.06.1982. Application No. 3005591 dated 18.11.1980. (In Russ.)

26. Duradji V.N., Polotebnova N.A., Bryancev I.V. Sposob vol'framirovaniya stal'nykh izdeliy i sostav dlya yego osushchestvleniya [Method of tungstenizing steel products and composition for its implementation]. Author's certificate SU 834238 A1, 30.05.1981. Application No. 2833682 dated 26.10.1979. (In Russ.)

27. Popov A.A. *Teoreticheskiye osnovy khimiko-termicheskoy obrabotki stali* [Theoretical foundations of chemical-thermal treatment of steel], Sverdlovsk: Sverdlovsk Middle Ural Book Publishing House, 1962, 119 p. (In Russ.)

28. Arzamasov B.N. (Ed.), Sidorin I.I., Kosolapov G.F., [et al.] *Materialovedeniye: Uchebnik dlya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Materials Science: Textbook for Higher Technical Educational Institutions], Moscow: Mashinostroenie, 1986, 384 p. (In Russ.)

29. Krishtal M.A. *Mekhanizm diffuzii v zheleznykh splavakh* [Diffusion mechanism in iron alloys], Moscow: Metallurgy, 1972, 400 p. (In Russ.)

30. Kidin I.N., Andryushechkin V.I., Volkov V.A. *Elektro-khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Electro-thermo-chemical treatment of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1978, 320 p. (In Russ.)

31. Geveling N.V. *Poverkhnostnaya elektrotermoobrabotka* [Surface electrothermal treatment], Moscow: ONTI, 1936, 135 p. (In Russ.)

32. Spektor A.G. [On the existence of the Geveling effect], *JTF*, 1951, vol. 21, issue 10, pp. 1153-1156. (In Russ., abstract in Eng.)

33. Gudtsov N.T., Sumin I.A. *Uskoreniye tsementatsii putem ispol'zovaniya elektricheskogo toka* [Acceleration of cementation by using electric current]. *Metallurg* [Metallurgist]. 1937. #. 4, pp. 55-58. (In Russ., abstract in Eng.)

34. Andryushechkin V.I. [Basic regularities observed during electro-chemical-thermal treatment of metals and alloys], In book: *Progressivnyye metody khimiko-termicheskoy obrabotki* [Progressive methods of chemical-thermal treatment], Moscow: Mashinostroenie, 1979, pp. 128-132. (In Russ.)

35. Bokshteyn B.S., Bokshteyn S.Z., Zhukhovitsky A.A. *Termodinamika i kinetika diffuzii v tverdykh telakh* [Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids]. Moscow: Metallurgy, 1974, 280 p. (In Russ.)

36. Kalinovich D.F., Kovensky I.I., Smolin M.D. [et al.] [Effect of direct current on the rate of steel carburization], *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals], 1964, no. 12, pp. 46-47. (In Russ., abstract in Eng.)

37. Aleksandrov V.A., Kazantsev V.F., Fatyukhin D.S. [Formation of a surface layer by the method of complex ultrasonic action and nitriding], *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering], 2013, no. 3, pp. 33-36. (In Russ., abstract in Eng.)

38. Kulemin A.V., Golikov V.M., Lazarev V.A. *i* [Diffusion of carbon in iron under ultrasonic influence], *Fizika metallov i metallovedeniye* [Physics of Metals and Metallography], 1973, vol. 36, no. 4, pp. 785-789. (In Russ., abstract in Eng.)

39. Safronov I.S., Ushakov A.I., Andrukhova O.V. [Parametric characteristics of nano- and micropores affecting their healing during selective laser processing]. *Prikladnaya matematika & Fizika* [Applied Mathematics & Physics], 2024, vol. 56, no. 3, pp. 226-233. doi 10.52575/2687-0959-2024-56-3-226-233. (In Russ., abstract in Eng.)

40. Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D. [Physics of healing of nanopores in condensed matter under the influence of laser radiation and high-temperature plasma], *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii* [Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation], 2024, vol. 62, no. 1, pp. 7-18. doi: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18 (In Russ., abstract in Eng.)

41. Larikov L.N., Falchenko V.M., Mazanko V.F. [Anomalous acceleration of diffusion under pulsed loading of metals], *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1975, vol. 221, no. 4, pp. 1073-1075. (In Russ., abstract in Eng.)

42. Shtremel M.A., Kaputkin D.E. [The role of vacancies in the decomposition of martensite], *Fizika metallov i metallovedeniye* [Physics of Metals and Metallography], 1992, no. 12, pp. 174-177. (In Russ., abstract in Eng.)

43. Kaputkin D.E. [Correlation between the thermokinetic parameters of diffusional decomposition and the activation energy of diffusion in steels and nonferrous metals], *Fizika metallov i metallovedeniye* [Physics of Metals and Metallography], 2005, vol. 99, no. 4, pp. 343-347. (In Russ., abstract in Eng.)

44. Kaputkin D.E., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D. Transformation of retained austenite during tempering of high carbon steel, *Journal de Physique IV*, 2003, vol. 112, October, pp. 275-278. doi: 10.1051/jp4:2003882

Einfluss von elektrischen Entladungen auf die Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit bei der Elektrolyt-Plasma-Bearbeitung von Metallen

Zusammenfassung: Die elektrolytische Plasmabehandlung beschleunigt die Sättigung der behandelten Stahloberfläche mit einem oder mehreren Elementen (N, C, B, W, V, Mo, Ti) um das 10- bis 1000-fache im Vergleich zur konventionellen chemisch-thermischen Behandlung aus der Gasphase. Es ist ein Modell vorgeschlagen und begründet, das diesen Prozess des Wachstums der Diffusionsschichtdicke erklärt und dabei die beschleunigte Bewegung der bombardierenden Ionen sowie die Heterogenität und Nichtstationarität der Temperaturverteilung unter der Oberfläche des verarbeiteten Materials berücksichtigt, die durch den Fluss elektrischer Entladungen verursacht wird. Es ist gezeigt, dass die Gründe für die Beschleunigung der

Oberflächensättigung die Erhöhung der Konzentration sättigender Elemente auf der behandelten Oberfläche, die lokale Temperaturerhöhung, das Auftreten variabler mechanischer Spannungen und die deutliche Abnahme der Aktivierungsenergie der Diffusion sind.

Influence des décharges électriques sur l'augmentation du taux de diffusion dans le traitement électrolytique-plasma des métaux

Résumé: Le traitement électrolytique-plasma accélère la saturation de la surface de l'acier traité avec un ou plusieurs éléments (N, C, B, W, V, Mo, Ti) de 10 à 1000 fois par rapport au traitement chimique – thermique conventionnel en phase gazeuse. Est proposé et justifié un modèle pour expliquer ce processus d'augmentation de l'épaisseur de la couche de diffusion en tenant compte du mouvement accéléré des ions bombardant, ainsi que de l'hétérogénéité et de l'instabilité de la distribution de la température sous la surface du matériau traité, causées par des décharges électriques. Est montré que l'accélération de la saturation de surface est due à l'augmentation de la concentration d'éléments de saturation sur la surface traitée, à l'augmentation locale de la température, à l'apparition de contraintes mécaniques variables et à une réduction significative de l'énergie d'activation de la diffusion.

Авторы: ***Капуткин Дмитрий Ефимович*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Москва, Россия; ***Капуткина Наталья Анатольевна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия.