



ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

ВЕСТНИК

2024 .
Том 30.
№ 1.

ТАМБОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Transactions of the Tambov
State Technical University

2024.

Том 30.

№ 1.

<http://vestnik.tstu.ru>



Россия Тамбов
Издательство ТГТУ

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

**ВЕСТНИК
Тамбовского
государственного
технического
университета**

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

2024. Том 30. № 1.

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

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

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».

Эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

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

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

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

Подписано в печать 12.04.2024. Дата выхода в свет 26.04.2024.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 15,50; уч.-изд. л. 17,70. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 011.

Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835

e-ISSN 2542-1409

Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024

© Коллектив авторов, 2024

EDITORIAL BOARD

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

Oleg Abonosimov, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Tambov State Technical University

Gennady Abramov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

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

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

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

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика.	
Управление. Приборы	6
Муромцев Д. Ю., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А., Третьяков А. А., Елизаров И. А., Назаров В. Н. Задача управления многосвязной производственной системой с использованием принципов бережливого производства	6
Соловьев Д. С. Формализация задачи и разработка алгоритма выбора метода нормализации данных для принятия решений	17
Артемова С. В., Каменская М. А., Карасев П. И., Ершов Н. С. Ву Чи Чиен, Доморникова А. А. Нечеткая модель управления интеллектуальной информационно-управляющей системы барабанной сушильной установки (<i>на английском языке</i>).....	28
Глазкова И. А., Ивановский М. А., Эль Эссави Б. Х. М. К вопросу формализации функционирования сложных систем распознавания образов	42
Матрохин М. А., Немтинов В. А., Егоров С. Я. Информационная поддержка принятия решений по выбору вида погружного барабана в установке гальванического покрытия деталей в насыпном виде	53
Лебедь Н. И., Токарев К. Е., Гапич Д. С. Моделирование параметров работы автоматизированной системы контроля признаков контаминации агрокультур в условиях клонального размножения методами цифровой цветометрии	66
Глазкова И. А., Ивановский М. А., Куприянова С. С., Эль Эссави Б. Х. М. Алгоритмы оценки эффективности функционирования информационной системы и ее элементов на основе принципа декомпозиции	76
Фролов С. В., Фролова Т. А., Лычагина В. О., Трушин Д. И., Шаталова И. А., Ширкина Е. С., Юрлов С. И., Яркин О. А. Биотехническая система для выращивания растений	85
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	95
Капранова А. Б., Бахаева Д. Д., Стенько Д. В., Верлока И. И. Моделирование смешения сыпучих компонентов в ротационном аппарате на платформе киберфизических систем	95
Альдауд С. С. Ю., Баранов А. А., Першин В. Ф. Математическая модель процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице	108
Еськов В. А., Дорохов Р. В., Пахомов А. Н. Регенеративный материал с улучшенными характеристиками для дымозащитного капюшона	122
Истомин А. М., Бакунин Е. С., Рухов А. В., Истомина В. И., Жабкина И. А., Гончарова М. С. Разработка комплексного катализатора для ускорения отверждения карбамидомеламинаформальдегидной смолы	130
Бобров М. Н., Печенкина Е. С. Практическое применение ступенчатого понижения плотности тока в процессах электроэкстракции меди при переработке медьсодержащих отходов.....	139
Машиностроение. Металлообработка	148
Бондаренко Н. В., Соколов М. В. Модернизация алгоритма расчета припуска на механическую обработку деталей для среды программирования Python	148
Потапов А. Н., Зямбаев Н. А. Упругопластический расчет рамы на действие горизонтальных сил методом перемещений	157
Божко Г. В., Фокина М. С., Нконди Ж. Д., Щагин А. М., Баскаков А. П. Экспериментальное определение осевой силы в крепежных деталях, возникающей при их моментной затяжке	170

CONTENTS

Automation. Information Technology.

Control. Instruments	6
Muromtsev D. Yu., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A., Tretyakov A. A., Elizarov I. A., Nazarov V. N. The Problem of Managing a Multi-Connected Production System Using Lean Manufacturing Principles	6
Solovjev D. S. Formalization of the Problem and Development of an Algorithm for Selecting a Data Normalization Method for Decision Making Support	17
Artemova S. V., Kamenskaya M. A., Karasev P. I., Ershov N. S., Vu Tri Chien, Domornikova A. A. A Fuzzy Control Model of an Intelligent Information-Measuring and Control System of a Drum Drying Unit (<i>in English</i>)	28
Glazkova I. A., Ivanovsky M. A., El Eissawi Badr Khalil Mahmud. To the Problem of Formalizing the Operation of Complex Pattern Recognition Systems	42
Matrokhin M. A., Nemtinov V. A., Egorov S. Ya. Information Support for Decision Making by Choosing the Type of Submerged Drum in the Installation for Galvanic Coating of Parts in Bulk Form	53
Lebed N. I., Tokarev K. E., Gapich D. S. Simulation of Operation Parameters of an Automated System for Monitoring Signs of Contamination of Agricultural Crops under Conditions of Clonal Reproduction by Digital Color Methods	66
Glazkova I. A., Ivanovsky M. A., Kupriyanova S. S., El Eissawi Badr Khalil Mahmud. Algorithms for Assessing the Efficiency of the Information System and its Elements Based on the Principle of Decomposition	76
Frolov S. V., Frolova T. A., Lychagina V. O., Trushin D. I., Shatalova I. A., Shirkina E. S., Yurlov S. I., Yarkin O. A. Biotechnical System for Growing Plants	85

Chemical Engineering and Related Industries.

Chemistry	95
Kapranova A. B., Bakhaeva D. D., Stenko D. V., Verloka I. I. Modeling of Mixing Bulk Components in a Rotary Device on a Cyber-Physical Systems Platform	95
Aldawood S. S. Yu., Baranov A. A., Pershin V. F. Mathematical Model of the Graphite Exfoliation Process in Bar Drum Mill	108
Eskov V. A., Dorokhov R. V., Pakhomov A. N. Regenerative Material with Improved Characteristics for the Smoke Protective Hood	122
Istomin A. M., Bakunin E. S., Rukhov A. V., Istomina V. I., Zhabkina I. A., Goncharova M. S. Development of a Complex Catalyst to Accelerate the Curing of Urea Melamine Formaldehyde Resin	130
Bobrov M. N., Pechenkina E. S. Practical Application of Step Reduction of Current Density in Processes of Electroextraction of Copper during Processing of Copper-Containing Waste	139

Mechanical Engineering. Metal Treatment

Bondarenko N. V., Sokolov M. V. Modernization of the Algorithm for Calculating Allowance for Mechanical Processing of Parts for the Python Programming Environment	148
Potapov A. N., Zyambaev N. A. Elastic-Plastic Calculation of a Frame for the Action of Horizontal Forces Using the Displacement Method	157
Bozhko G. V., Fokina M. S., Nkondi J. D., Shchagin A. M., Baskakov A. P. Experimental Determination of the Axial Force in Fastening Parts Arising upon their Torque Tightening	170

**ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНОЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИНЦИПОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Д. Ю. Муромцев¹, Б. С. Дмитриевский², А. А. Терехова^{2✉},
А. А. Третьяков², И. А. Елизаров², В. Н. Назаров²**

*Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
«Информационные процессы и управление»,
terehova.aa@mail.tstu.ru (2); ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: бережливое производство; информационные потоки; организационные процессы; производственная система; система управления; состояние системы; технологические процессы; управляющие воздействия.

Аннотация: Рассмотрены особенности многосвязных производственных систем и задач управления ими. Предложена модель многосвязных производственных систем как совокупность процессов производственного цикла, с учетом материальных, информационных потоков и возмущений от внутренней и внешней среды. Состояние многосвязной производственной системы оценивается технологическими, технико-экономическими, организационными показателями и показателями эффективности инвестиционных вложений. Предложен подход к управлению на основе концепции бережливого производства, сформулирована цель управления и поставлена задача управления, как поиск рациональных управляющих воздействий. Рассмотрены структура системы управления и функциональные подсистемы.

Введение

Многосвязные производственные системы (МПС) в своем составе имеют большое число интенсивно эксплуатируемого технологического оборудования, а также разнообразных технологических, ремонтных, информационных, трудовых и других процессов и отличаются наличием организационной составляющей из-за присутствия в них сотрудников. Поэтому, кроме задач управления технологическим оборудованием, важное значение имеют управленческие задачи организационного характера (планирование, учет, составление расписаний и т.п.) [1 – 6].

Улучшение управления в МПС состоит в усовершенствовании системы взаимосвязанных материальных и информационных потоков, в выработке оперативных управленческих воздействий.

Востребованность усовершенствования обусловлена следующими обстоятельствами:

– в период санкций становится актуальной задача управления МПС в непредсказуемых условиях;

– возрастает значение МПС в решении оборонных и народнохозяйственных задач;

– увеличивается роль использования технологий двойного применения.

Основная особенность задачи управления МПС из-за ее сложности как объекта управления состоит:

1) в большой размерности задачи, огромном количестве распределенных во времени и пространстве разнообразных возмущающих и управляющих воздействий;

2) использовании документооборота, посредством которого осуществляется хранение информации и ее движение, связанное с большим числом сотрудников, участвующих в управлении.

Анализ многосвязной производственной системы

Рассмотрим формализацию управления МПС. В отличие от технологических процессов, в производственных, наряду с оборудованием, присутствуют люди, наделенные правом принимать управленческие решения, их поведение в различных ситуациях может быть разным. Как будет вести себя оборудование можно описать математической моделью, поведение сотрудников – практически нельзя. В многосвязной производственной системе взаимосвязи между элементами носят как информационный, так и материально-технический характер. Здесь важна обработка информации о состоянии системы, которую следует превратить в информацию для принятия решений [7 – 10]. При этом необходима взаимосвязь между элементами в планировании, распределении ресурсов и т.п.

Для многосвязной производственной системы актуальной целью становится формирование единой автоматизированной системы управления (АСУ), которая обеспечит реализацию всех задач управления [11 – 16]. Представим модель МПС как совокупность процессов производственного цикла, учитывающих как материальные, так и информационные потоки, а также внутреннюю и внешнюю среды (рис. 1).



Рис. 1. Модель управления МПС:

S_z, S_t – соответственно заданное и текущее состояние МПС;

U, Z, V – воздействия соответственно управляющее, внешней и внутренней среды

Конкурентоспособность продукции зависит как от ее технологического уровня, определяющего новизну и соответствие требованиям покупателей, так и от уровня издержек, зависящего от применяемой технологии. Отсюда появляются задачи минимизации издержек производства, быстрой перестройки многосвязных технологических процессов, поставки выпускаемой продукции небольшими объемами с заданным качеством, удовлетворяющим покупателя.

Производство достигнет поставленной цели при выпуске продукции, которая быстро и выгодно продается. Для этого необходимы оценивающие показатели продажи всех видов продукции, на основе которых можно останавливать выпуск продукции, плохо влияющей на платежеспособность и оборачиваемость активов, или, в противном случае, ускорять продажу. При этом следует уменьшать затраты, не обеспечивающие воспроизводство производственных фондов и оборотных средств. При существующих в настоящее время темпах инфляции и скорости оборота оборотных активов необходимо уменьшить направление прибыли на увеличение оборотных средств, так как это приводит к занижению расчетной себестоимости и перетоку в прибыль оборотных средств, которая идет на налоги и внепроизводственные расходы.

Выбор методологии управления

В качестве средства системного подхода к управлению МПС выберем интеграцию концепции бережливого производства и поддержание следующих показателей производственных процессов на заданном уровне: технологических, технико-экономических, организационных, эффективности инвестиционных вложений. Под концепцией «бережливого производства» будем понимать получение ценности, представляющей совокупность характеристик продукции, за которую покупатель готов заплатить производителю.

Рассматривая управление МПС с позиции управления «бережливым производством», включая процессы с потребителями, повышается эффективность производственной системы за счет эффективности АСУ. Таким образом, можно достигнуть оптимальности как продукции (повысить качество) за счет снижения издержек и потерь, так и производственного процесса, в том числе планирования, маркетинга, закупок материалов, реализации продукции и т.д.

В нашей стране традиционно учитывают полную себестоимость. Однако можно рассчитывать затраты способом, когда учитывается неполная себестоимость. В условиях «бережливого производства» необходимы новые системы формирования информации о затратах. Следует разбить все затраты на элементы и затем определенным образом структурировать по виду затрат, работ, продукции, рабочему месту, экономическим элементам и статьям калькуляции. Необходимо выделить объект «ответственный исполнитель» – сотрудник, ответственный за возникновение каждого вида расходов. Исходя из специфики МПС, необходимо определить, как классифицировать затраты, детализировать места, на которых они возникают и как они связаны с «ответственными исполнителями». Это позволит рассчитать на каждый заказ показатели плановой и фактической степени покрытия, определить отклонение и «узкие» места и соответственно принять правильные управленческие решения. Если проанализировать ситуацию, то можно планировать затраты и управлять финансовыми результатами в заданный период времени.

Под управлением МПС будем считать процесс формирования и реализации мер организационно-технического характера, обеспечивающих эффективное протекание технологических и организационных процессов. Для этого необходимо управлять указанными процессами в реальном времени.

Задачей управления МПС является определение планового хода процессов производства; текущего состояния процессов; проведение анализа отклонения с последующим выбором управляющего воздействия по распределению имеющихся ресурсов, сводящих данные отклонения к минимуму.

Цель управления МПС, повышающего «бережливость», состоит в обеспечении ее функционирования путем адаптации к внешней и внутренней среде, согласования и координации оперативных планов по всем бизнес-процессам МПС, обеспечения каждого уровня управления необходимой информацией, контроля выполнения планов, их корректировки, создания мотивации персонала к заинтересованности и готовности каждого к взаимодействию по усовершенствованию рабочего процесса.

Постановка задачи управления

Для эффективного управления МПС предлагается *принцип управления*, рассматривающий МПС как совокупность технологических и бизнес-процессов и основанный на обратной связи, учитывающей внутреннюю среду.

Оперативное управление МПС осуществляется за счет координации планов и ресурсов. От процессов производства передается информация об их состоянии в подсистемы управления. На основе анализа данных принимаются управляющие воздействия.

Вектор входных переменных

$$u = \langle u_1, u_2, u_3 \rangle, u \in U$$

характеризует технологические, внутренние и внешние информационные потоки.

Вектор выходных переменных

$$s = \langle s_1, s_2, s_3, s_4 \rangle, s \in S$$

характеризует состояние производственной системы в каждый момент времени, которое определяется следующими показателями: технологическими s_1 , технико-экономическими s_2 , организационными s_3 , эффективности инвестиционных вложений s_4 .

Под оптимальным управляющим воздействием будем понимать такое, которое обладает экстремальным свойством по отношению к критерию «ценность продукции», причем выявление ценности продукции происходит на каждом этапе жизненного цикла продукции.

Рациональным будем называть управляющее воздействие, которое удовлетворяет сложившемуся уровню требований покупателя к ценности продукции. Класс рациональных воздействий включает в себя класс оптимальных.

Поставим задачу управления МПС как поиск рациональных управляющих воздействий и сформулируем ее следующим образом: на всех этапах жизненного цикла продукции найти управляющие воздействия r^* , при которых выполняется концепция «бережливого производства»

$$\Theta^* < \Theta = F(z, v, r) < \Theta^{**} \quad (1)$$

с учетом внешней и внутренней среды и ограничениями на ресурсы:

$$\begin{aligned} z &\in Z; \\ v &\in V; \\ r &= f(u, s); \\ s &= \varphi(u); \\ u &\in U; \\ s &\in S, \end{aligned} \quad (2)$$

где r – кортеж управляющих воздействий; $\mathcal{E}$ – ценность продукции; $\mathcal{E}^{**}$, $\mathcal{E}^*$ – верхняя и нижняя границы показателя ценности продукции; Z , V , S – множества состояний внешней и внутренней среды и состояний МПС соответственно; U – множество ресурсов на данный момент времени.

К возмущениям из внешней среды отнесем отклонения сроков поставок материалов, повышение цен и др.; из внутренней – внеплановые ремонтные работы, отклонения норм расхода материалов, больничные сотрудников и т.п. Управляющие воздействия в МПС также имеют разнообразный характер: задания по производству и реализации продукции в разные периоды, выполнению заказов, заработной плате и др. Управляющие воздействия в организационных процессах определяются из создаваемых управленческих отчетов, а в технологических – с использованием математических моделей.

Подсистемы автоматизированной системы управления многовязной производственной системы

Автоматизированная система управления МПС представляет собой многоуровневую систему [17 – 20]. У каждого уровня есть свои особенности: на верхнем – планирование проектов и оперативное планирование; среднем – управление организационными процессами; нижнем – управление технологическими процессами.

Каждый уровень системы управления (кроме высшего) получает плановое задание с верхнего, определяет необходимые ресурсы для выполнения задания и реализовывает его. В отдельные периоды цели имеют конкретный вид, выраженный используемыми критериями. Последовательно согласовывая цели подсистем разного уровня, добиваемся эффективного управления. При этом для принятия управляющих воздействий важную роль играют функционально-информационные модели, дающие возможность построить информационные модели и на их основе разработать базы данных, образующие единое информационное пространство. Информация поступает от внешних источников и подсистем. Структурная схема АСУ МПС представлена на рис. 2.

Модуль «Выбор инвестиционного проекта» осуществляет планирование продукции заданного качества. Чтобы определить конкурентоспособность продукции объединяются показатели технологического уровня всех производственных участков. Управление инвестиционными проектами состоит в определении типов продукции, обеспечивающей минимальные издержки, и планировании выпуска в необходимых объемах именно данной продукции. Это возможно сделать путем моделирования.

В модуле «Составление производственных расписаний» проводится оперативное управление процессами производства с учетом: технологических ограни-

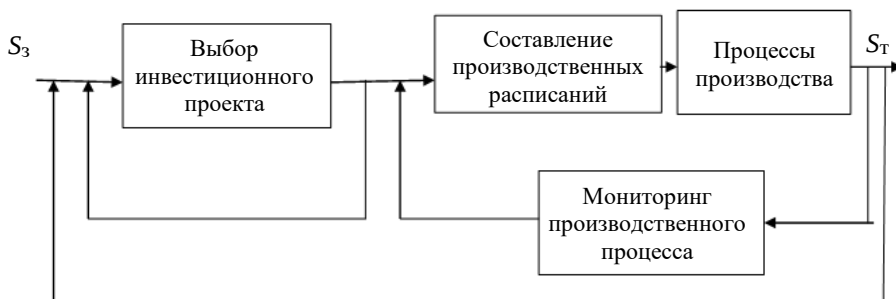


Рис. 2. Структурная схема АСУ МПС

чений (графиков работы оборудования, производительности, характера взаимосвязи среди операций, временем технологических переходов и др.); особенностей производственной среды (задержания поставок сырья, наименований товарной номенклатуры и др.); материально-технических ресурсов.

Модуль «Мониторинг производственного процесса» в реальном времени показывает нахождение каждого вида ресурса и его размещение в рабочую смену. Визуализация производственного процесса осуществляется с помощью таблиц и графиков.

Автоматизированная система управления МПС основана на использовании оперативных данных от наиболее важных функциональных подсистем (рис. 3).

Цель управления МПС достигается разработкой методологической базы АСУ МПС, задача которой состоит в управлении не только технологическими, но и организационными процессами, в том числе обеспечением производства, маркетингом, реализацией продукции и др.

Функциональная структура подсистемы управления организационными процессами (рис. 4) состоит из подсистем:

- формирования инвестиционных проектов;
- оперативного планирования и управления;
- управления материально-техническими ресурсами, потоками энергии, энергооборудованием, затратами и производительностью труда.

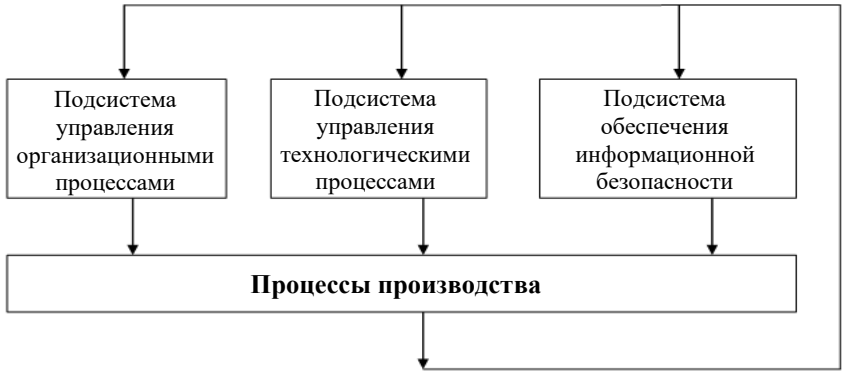


Рис. 3. Функциональная структура АСУ МПС



Рис. 4. Функциональная структура подсистемы управления организационными процессами

Заключение

Создание автоматизированной системы управления многосвязной производственной системой позволит:

- выбрать наилучший инвестиционный проект;
- обеспечить управление многосвязным производством по критерию «безрежливое производство»;
- оперативно оценивать результативность задач планирования и их корректировки;
- найти потребности в ресурсах для обеспечения потребностей покупателей;
- определить «узкие места» производственного цикла;
- установить, на каком технологическом оборудовании выполняется заказ, рассчитать производительность труда, затраты на производство;
- сократить количество непредусмотренных остановок производства.

Список литературы

1. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.000-000
2. Интегрированная модель инновационно-производственной системы / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, Н. С. Попов, О. В. Дмитриева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 550 – 558. doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.000-000
3. Modeling of Industrial System Dynamics / V. G. Matveykin, B. S. Dmitrievskiy, A. A. Shatilova, A. E. Filina, S. G. Semerzhinskiy // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 452 – 458.
4. Щербатов, И. А. Математическое моделирование сложных многокомпонентных систем / И. А. Щербатов, И. О. Проталинский // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 17 – 26
5. Райбман, Н. С. Построение моделей процессов производства / Н. С. Райбман, В. М. Чадеев. – М. : Энергия, 1975. – 375 с.
6. Дмитриевский, Б. С. Моделирование и анализ сложных технических систем и технологических процессов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Б. С. Дмитриевский. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод 84,1 Mb RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
7. Application of Optimal Control Theory to Hybrid Objects to Minimize Greenhouse Gases Emissions / D. Yu. Muromtsev, A. Traverso, A. N. Gribkov, I. A. Kurkin // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 430 – 439.
8. Глазкова, В. В. Оценка точности вычисления нижних граничных значений вероятностей состояний функционирования сложных систем / В. В. Глазкова, Д. Ю. Муромцев, В. Н. Шамкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 340 – 349. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.340-349
9. Арзамасцев, А. А. Численное исследование математических моделей распределенных многомерных объектов на основе неявных разностных схем / А. А. Арзамасцев, Д. В. Залевский // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 232 – 240. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.232-240
10. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем / Е. И. Мартыанов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 336 – 344. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344
11. Управление объектами с взаимосвязанными величинами / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов // Вестн.

Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 206 – 218. doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218

12. Управление расписанием многосвязной производственной системы / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, М. В. Лемкина, С. Н. А. Аль Кнфер, М. А. Д. Аль Амиди // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 50 – 61. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.050-061

13. Дмитриевский, Б. С. Автоматизированное управление производственной системой: построение модели и перевод в инновационное состояние / Б. С. Дмитриевский, О. В. Дмитриева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 284 – 291

14. Разработка программного комплекса системы управления сложными производственными процессами / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, С. Н. А. Аль Кнфер, М. А. Д. Аль Амиди // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 168 – 184. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.168-184

15. Залукаева, Н. Ю. Информационно-управляющая система распределения топливных пеллет от производителя до потребителя / Н. Ю. Залукаева, А. Н. Грибков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 24 – 34. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.024-0344

16. Разработка системы управления многосвязными технологическими процессами на примере пищевых производств / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, С. Э. Эктов, Р. В. Воронков, М. Л. Гогорян, Д. Г. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 352 – 362. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.352-362

17. Грибков, А. Н. Информационно-управляющие системы многомерными технологическими объектами: теория и практика : монография / А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 164 с.

18. Муромцев, Д. Ю. Усовершенствование подсистемы обеспечения работоспособности средств защиты информации в системе мониторинга инцидентов информационной безопасности банка / Д. Ю. Муромцев, С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 176 – 187. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.176-187

19. Dmitrievsky, B. Digital Management System for the Formation of a Portfolio of Innovative Projects in the Agro-Industrial Complex / B. Dmitrievsky, A. Terekhova, S. Al. Knfer, M. Al Amedee and A. Senan // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723. – P. 032029. doi:10.1088/1755-1315/723/3/032029

20. Digitalization of Energy Management in an Industrial Enterprise / M. Krasnyansky, V. Matveykin, B. Dmitrievsky, A. Kobelev, A. Terekhova, V. Kobeleva // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – 2021. – P. 633 – 635. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632131

The Problem of Managing a Multi-Connected Production System Using Lean Manufacturing Principles

**D. Yu. Muromtsev¹, B. S. Dmitrievsky², A. A. Terekhova^{2✉},
A. A. Tretyakov², I. A. Elizarov², V. N. Nazarov²**

*Departments: “Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems” (1),
“Information Processes and Management”, terekhova.aa@mail.tstu.ru (2);
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: lean manufacturing; information flows; organizational processes; production system; control system; state of the system; technological processes; control influences.

Abstract: The features of multi-connected production systems and their management problems are considered. A model of multi-connected production systems is proposed as a set of processes in the production cycle, taking into account material, information flows and disturbances from the internal and external environment. The state of a multi-connected production system is assessed by technological, technical-economic, organizational indicators and the investment effectiveness. An approach to management based on the concept of lean production is proposed, the goal of management is formulated and the management task is set as a search for rational control actions. The structure of the control system and functional subsystems are considered.

References

1. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiply connected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.000-000 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Popov N.S., Dmitriyeva O.V. [Integrated model of innovation and production system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 550-558. doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.000-000 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Shatilova A.A., Filina A.E., Semerzhinskiy S.G. Modeling of Industrial System Dynamics, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 452-458.
4. Shcherbatov I.A., Protalinskiy I.O. [Mathematical modeling of complex multi-component systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 17-26 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Raybman N.S., Chadeyev V.M. *Postroyeniye modeley protsessov proizvodstva* [Construction of models of production processes], Moscow: Energiya, 1975, 375 p. (In Russ.)
6. Dmitriyevskiy B.S. *Modelirovaniye i analiz slozhnykh tekhnicheskikh sistem i tekhnologicheskikh protsessov* [Modeling and analysis of complex technical systems and technological processes], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2014. (In Russ.)
7. Muromtsev D.Yu., Traverso A., Gribkov A.N., Kurkin I.A. Application of Optimal Control Theory to Hybrid Objects to Minimize Greenhouse Gases Emissions, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 430-439.
8. Glazkova V.V., Muromtsev D.Yu., Shamkin V.N. [Estimation of the accuracy of calculating the lower boundary values of the probabilities of states of functioning of complex systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 340-349. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.340-349 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Arzamastsev A.A., Zalevskiy D.V. [Numerical study of mathematical models of distributed multidimensional objects based on implicit difference schemes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 232-240. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.232-240 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V., Alekseyev V.V. [Problem-oriented control system 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. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Control of objects with interrelated quantities], *Transactions of the*

Tambov State Technical University, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 206-218. doi: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Terekhova A.A., Lemkina M.V., Al'Knfer S.N.A., Al' Amidi M.A.D. [Schedule management of a multi-connected production system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 50-61. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.050-061 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Dmitriyevskiy B.S., Dmitriyeva O.V. [Automated control of a production system: building a model and transferring to an innovative state], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 284-291 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Terekhova A.A., Al' Knfer S.N.A., Al' Amidi M.A.D. [Development of a software complex for a control system for complex production processes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 168-184. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.168-184 (In Russ., abstract in Eng.)

15. Zalukayeva N.Yu., Gribkov A.N. [Information and control system for the distribution of fuel pellets from producer to consumer], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 24-34. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.024-0344 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Terekhova A.A., Ektov S.E., Voronkov R.V., Gogoryan M.L., Dmitriyev D.G. [Development of a control system for multi-connected technological processes using the example of food production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 352-362. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.352-362 (In Russ., abstract in Eng.)

17. Gribkov A.N., Muromtsev D.Yu. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy mnogomernymi tekhnologicheskimi ob'yektami: teoriya i praktika: monografiya* [Information and control systems for multidimensional technological objects: theory and practice: monograph], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2016, 164 p. (In Russ.)

18. Muromtsev D.Yu., Popov S.V., Shamkin V.N. [Improvement of the subsystem for ensuring the operability of information security tools in the system for monitoring bank information security incidents], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 176-187. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.176-187 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Dmitriyevskiy B., Terekhova A., Al Knfer S., Al Amedee M., Senan A. Digital Management System for the Formation of a Portfolio of Innovative Projects in the Agro-Industrial Complex, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 723, pp. 032029. doi:10.1088/1755-1315/723/3/032029

20. Krasnyansky M., Matveykin V., Dmitriyevskiy B., Kobelev A., Terekhova A., Kobeleva V. Digitalization of Energy Management in an Industrial Enterprise, *3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 2021, pp. 633-635. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632131

Das Problem der Verwaltung eines mehrfach vernetzten Produktionssystems nach Prinzipien der schlanken Produktion

Zusammenfassung: Es sind die Merkmale mehrfach vernetzter Produktionssysteme und deren Managementprobleme betrachtet. Es ist ein Modell mehrfach vernetzter Produktionssysteme als eine Reihe von Prozessen im Produktionszyklus vorgeschlagen, das Material-, Informationsflüsse und Störungen aus

der internen und externen Umgebung berücksichtigt. Der Zustand eines mehrfach vernetzten Produktionssystems wird anhand technologischer, technisch-wirtschaftlicher, organisatorischer Indikatoren und der Wirksamkeit von Investitionsinvestitionen beurteilt. Es sind ein Managementansatz basierend auf dem Konzept der Lean Production vorgeschlagen, das Ziel des Managements formuliert und die Managementaufgabe als Suche nach rationalen Steuerungsmaßnahmen festgelegt. Berücksichtigt sind die Struktur des Steuerungssystems und funktionale Subsysteme.

Le problème de la gestion d'un système de production multi-interconnecté avec l'utilisation des principes de la production économe

Résumé: Sont examinées les caractéristiques des systèmes de production multi-interconnectés et leurs tâches de gestion. Est proposé le modèle des systèmes de production multi-interconnectés comme un ensemble de processus du cycle de production, en tenant compte des flux matériels, des flux d'information et des perturbations de l'environnement interne et externe. L'état du système de production multi-lien est évalué par les indicateurs technologiques, technico-économiques, organisationnels et par l'efficacité des investissements. Est proposée une approche de la gestion basée sur le concept de production économe; est formulé l'objectif de la gestion; est définie la tâche de la gestion comme la recherche d'influences de gestion rationnelles. Sont examinés la structure du système de contrôle et les sous-systèmes fonctionnels.

Авторы: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Терехова Анастасия Андреевна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Третьяков Александр Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Елизаров Игорь Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Назаров Виктор Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА МЕТОДА НОРМАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Д. С. Соловьев✉

*Кафедра «Математическое моделирование и информационные технологии»,
solovjevdenis@mail.ru; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: выбор метода; нормализация данных; принятие решений; разработка алгоритма; формализация задачи.

Аннотация: Одной из ключевых проблем принятия решений является выбор подходящего метода нормализации данных, который обеспечивает их сопоставимость и возможность последующего анализа. Рассмотрена формализация задачи и разработка алгоритма выбора метода нормализации данных для принятия решений. Продемонстрирована реализация предлагаемого подхода к выбору метода нормализации данных на примере задачи принятия решения по определению лучших параметров для гальванического процесса нанесения цинкового покрытия. Найденное решение подтверждает получение надежных и достоверных результатов с использованием выбранных методов нормализации согласно предлагаемому подходу.

Введение

Принятие решений – важнейший процесс в различных сферах человеческой деятельности – от технологического обслуживания токарных станков [1], проектирования сети общеобразовательных школ [2], развития сети газовых заправочных станций [3], управления качеством функционирования структурных элементов в организационно-технических системах [4] до производства катализаторов для синтеза углеродных нанотрубок [5]. Для повышения эффективности результатов принятия решений необходимо постоянное исследование вопросов, возникающих при реализации данного процесса, в целях их преодоления.

Одной из ключевых проблем в процессе принятия решений является выбор подходящего метода нормализации данных. Нормализация используется для преобразования данных в стандартный формат для устранения шумов и разнородности размерностей, что обеспечивает сопоставимость данных и возможность их последующего анализа. Для ее реализации применяются такие методы, как линейная нормализация по Вейтendorфу, векторная, логарифмическая и пр. [6] Матрица решений, полученная после применения различных методов нормализации, расчетные формулы которых отличаются, будет оказывать первостепенное влияние на результат принятого решения.

В ряде работ проведены исследования по применению методов нормализации данных. Так, например, в работе [7] приводится анализ влияния линейной нормализации по Вейтendorфу на решение многокритериальных экономических задач при помощи максиминных критериев, в ходе которого установлена невозможность использования данного метода из-за неустойчивости к изменениям

ограничений. Применение метода нормализации, обеспечивающего представление гиперпространства частных критериев близким к единичному гиперкубу, описывается в работе [8]. Выбор метода нормализации путем оценки значения функции расстояния между данными рассматривается в работе [9]. Использование метода нормализации, который обеспечивает данным равную важность с точки зрения их изменчивости, предлагается в работе [10]. Однако отсутствует формализованный единый подход к выбору метода нормализации не только от имеющихся данных в матрице решений, но и от применяемого метода выбора лучшей альтернативы (решения задачи многокритериальной оптимизации), что обуславливает актуальность приведенного исследования.

Цель работы – формализация задачи и разработка алгоритма выбора метода нормализации данных для принятия решений.

Формализация задачи выбора метода нормализации данных

Для формализации задачи выбора метода нормализации данных воспользуемся методологией IDEF0, позволяющей привести системно-структурное описание данного процесса [11]. Вначале при помощи методологии IDEF0 рассмотрим сам процесс принятия решений, декомпозиция контекстной диаграммы которого показана на рис. 1.

В таком случае процесс принятия решений предполагает три основных процесса: A1 – нормализация данных; A2 – расчет весовых коэффициентов значимости критериев; A3 – выбор лучшей альтернативы. Механизмом для всех процессов A1 – A3 является лицо, принимающее решение. Процесс ограничен методами принятия решений, которые можно разделить на три категории: методы нормализации (для A1), методы расчета весовых коэффициентов значимости критериев (для A2) и методы выбора лучшей альтернативы (для A3).

Входная информация для процесса A1 включает в себя матрицу решения и типы критериев, в то время как выходной информацией является нормализованная матрица решений. Для процесса A2 входная информация – нормализованная матрица решений и типы критериев, а выходная – весовые коэффициенты значимости критериев. Для процесса A3 входная информация содержит нормализованную матрицу решений, типы критериев и весовые коэффициенты значимости критериев, а в качестве выходной информации выступает лучшая альтернатива.

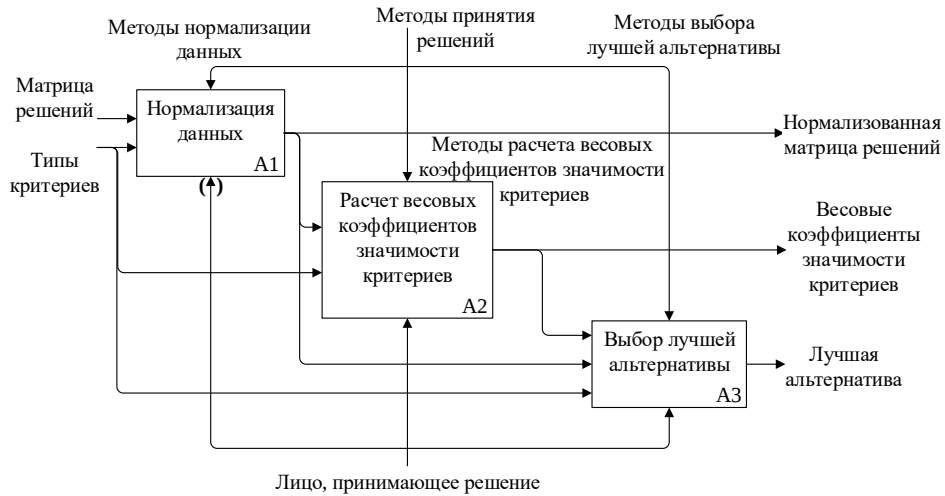


Рис. 1. Декомпозиция контекстной IDEF0-диаграммы процесса принятия решений

Процесс начинается с того, что лицо, принимающее решение, предоставляет матрицу решений, содержащую все возможные альтернативы и их оценки по каждому критерию. Затем в данных путем применения различных методов нормализации устраняется несоответствие в размерностях. После этого определяются весовые коэффициенты значимости критериев с помощью различных методов расчета. Наконец, при наличии нормализованных данных и весовых коэффициентов значимости критериев, лицо, принимающее решение, может использовать различные методы для выбора лучшей альтернативы. Выбранной лучшей альтернативой является та, которая имеет наивысший общий балл, рассчитываемый, как правило, путем объединения нормализованных оценок по каждому критерию с их соответствующими весовыми коэффициентами значимости.

Для описания предлагаемой реализации процесса A1 воспользуемся его декомпозицией. На рисунке 2 показана декомпозиция диаграммы процесса нормализации данных по методологии IDEF0.

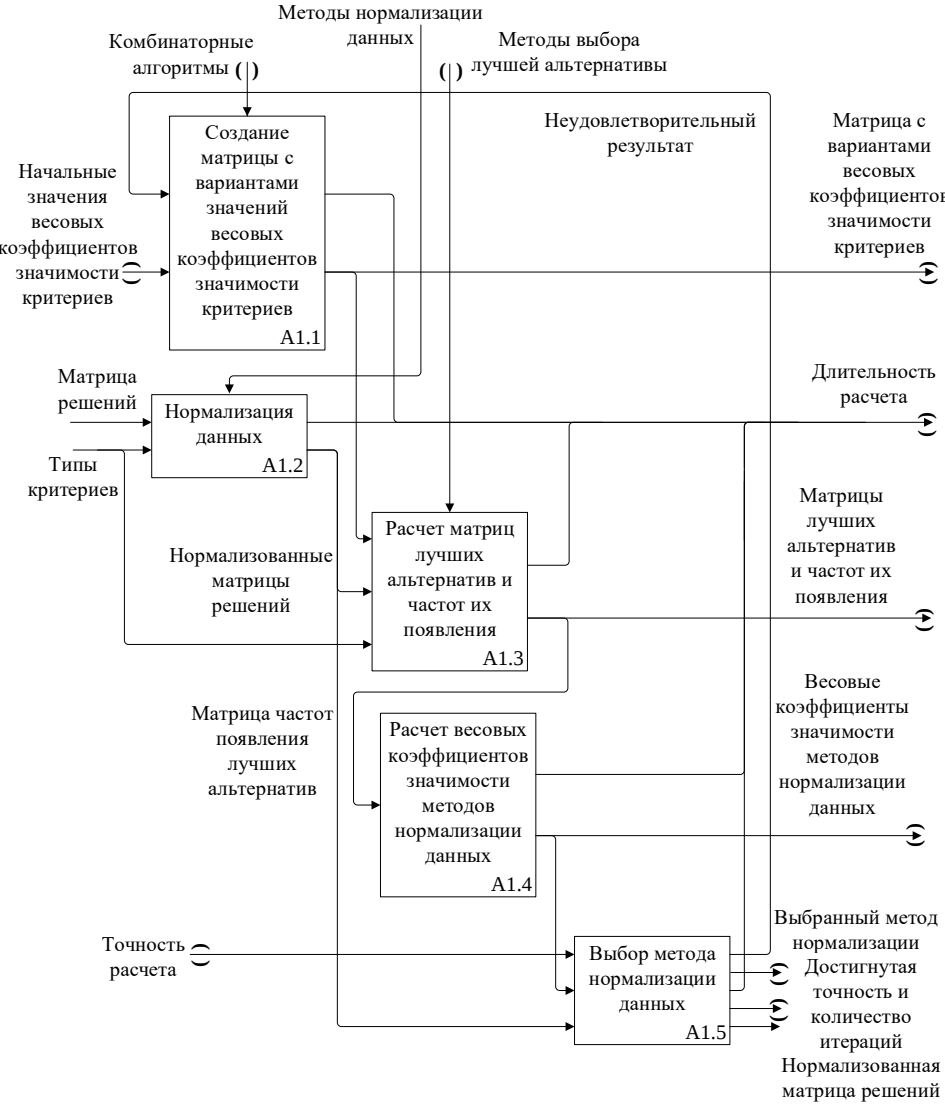


Рис. 2. Декомпозиция IDEF0-диаграммы процесса нормализации данных

Процесс A1 состоит из пяти подпроцессов: A1.1 – создание матрицы с вариантами значений весовых коэффициентов значимости критериев; A1.2 – нормализация данных; A1.3 – расчет матриц лучших альтернатив и частот их появления; A1.4 – расчет весовых коэффициентов значимости методов нормализации данных; A1.5 – выбор метода нормализации данных. Общей выходной информацией для всех подпроцессов A1.1 – A1.5 является длительность расчета.

Подпроцесс A1.1 основывается на начальных значениях весовых коэффициентов значимости критериев, а выходной информацией выступает матрица с вариантами весов. Комбинаторные алгоритмы используются в качестве механизма для данного подпроцесса.

Подпроцесс A1.2 принимает в качестве входной информации матрицу решений с типами критериев и формирует нормализованные матрицы решений, полученные при помощи методов нормализации, являющихся механизмом.

Подпроцесс A1.3 использует нормализованные матрицы решений, матрицу с вариантами весовых коэффициентов значимости критериев и типы критериев для расчета матриц лучших альтернатив и частот их появления. Механизмом являются методы выбора лучшей альтернативы.

Подпроцесс A1.4 на основе матрицы частот появления лучших альтернатив (входная информация) формирует весовые коэффициенты значимости методов нормализации данных (выходная информация).

Весовые коэффициенты значимости методов нормализации данных, нормализованные матрицы решений и точность расчета используются подпроцессом A1.5 в качестве входной информации для выбора метода нормализации данных. Его выходная информация содержит выбранный метод нормализации, достигнутую точность и количество итераций, а также нормализованную матрицу решений. В случае недостижения точности расчета информация о неудовлетворительном результате используется в качестве входной информации у подпроцесса A1.1 для создания новой матрицы с вариантами весовых коэффициентов значимости критериев, тем самым организуя обратную связь по входу.

Разработка алгоритма выбора метода нормализации данных

Сформулируем математическую постановку данной задачи следующим образом: для заданной матрицы решений S необходимо использовать такой метод нормализации M_{t^*} и ему соответствующую матрицу решений $\bar{S}_{t^*} = M_{t^*}(S)$, которые для метода выбора лучшей альтернативы $G(\bar{S}_{t^*}, \omega)$ обеспечивают получение наиболее часто встречаемой лучшей альтернативы при различных B сочетаниях значений весовых коэффициентов значимости критериев ω , то есть:

$$t^* = \operatorname{argmax}_{t=1, \dots, T} \gamma_t = \operatorname{argmax}_{t=1, \dots, T} \frac{\sum_{b=1}^B v_{b,t}}{\sum_{b=1}^B \sum_{t=1}^T v_{b,t}}, \quad (1)$$

где γ_t – весовой коэффициент значимости t -го метода нормализации; T – число методов нормализации; $v_{b,t}$ – частота появления лучшей альтернативы при b -м сочетании весовых коэффициентов значимости критериев в t -м методе нормализации.

Рассмотрим алгоритм решения задачи (1). Первым шагом является создание матрицы с B вариантами значений весовых коэффициентов значимости критериев ω . Это делается с помощью комбинаторных алгоритмов, которые позволяют перебрать все возможные комбинации весовых коэффициентов для каждого критерия. Затем происходит нормализация данных $\bar{S}_t$ с использованием различных методов M_t . После этого посредством соответствующего метода выбора $G(\bar{S}_t, \omega)$ проводится расчет матриц лучших альтернатив и частот их появления $\nu_{b,t}$ путем подсчета количества раз, когда каждая альтернатива была выбрана как лучшая. Далее происходит расчет весовых коэффициентов значимости методов нормализации данных γ_t . Такие коэффициенты отражают выбор наиболее часто встречаемой лучшей альтернативы. Таким образом, метод с наибольшим весовым коэффициентом будет считаться наиболее предпочтительным для нормализации данных. Если требуемая точность расчета ε коэффициента значимости метода нормализации не достигнута, то значения весовых коэффициентов значимости критериев ω могут быть изменены и процесс повторяется снова до ее достижения.

Вычислительный эксперимент

Реализацию предлагаемого подхода к выбору метода нормализации данных рассмотрим на примере задачи принятия решения по определению лучших параметров (концентрации веществ в электролите $C_{i,1}$, $C_{i,2}$, ..., температуры t_i , кислотности pH, плотности тока j_i , длительности процесса T_i) для гальванического процесса среди возможных альтернатив A_i ($i = 1, \dots, m$), которые обеспечивают оптимальные значения m критериев качества получаемого покрытия (K_1 – толщина, мкм; K_2 – микротвердость, кг/мм²; K_3 – шероховатости, мкм; K_4 – удельное сопротивление, Ом/м; K_5 – коэффициент отражения, %; K_6 – адгезия, Н/м²; K_7 – пористость, см⁻²; K_8 – коррозионная стойкость, %; K_9 – износ, г/с). Критерии K_1 , K_2 , K_5 , K_6 и K_8 имеют тип максимизации, а K_3 , K_4 , K_7 и K_9 – минимизации.

Для гальванического процесса нанесения цинкового покрытия значения альтернатив по критериям из матрицы решений, по которой проводится выбор, показаны на рис. 3.

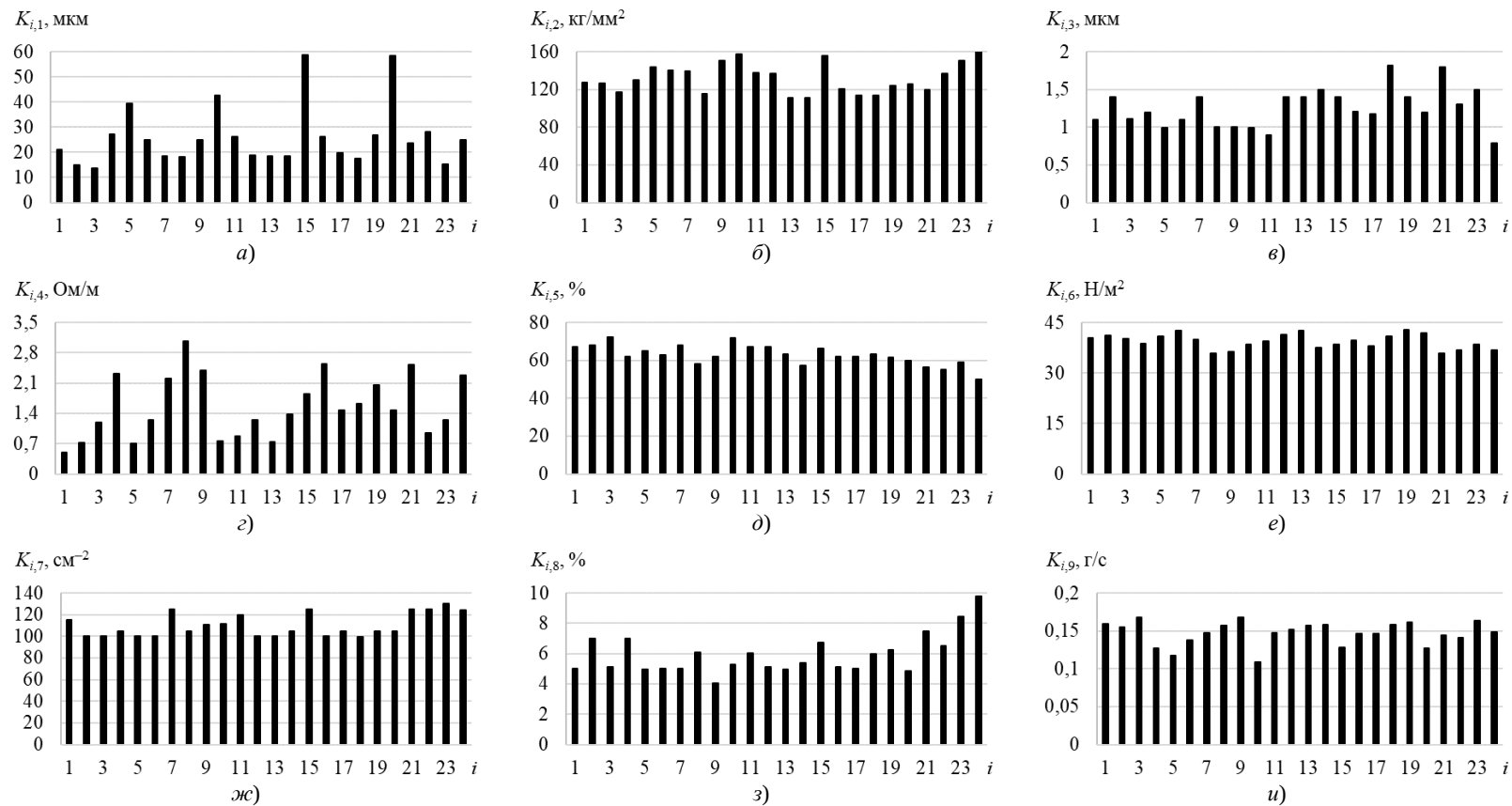
Пусть в качестве метода выбора лучшей альтернативы выступает взвешенный аддитивный критерий качества. В таком случае, математическая постановка задачи принятия решений будет звучать следующим образом: выбрать альтернативу A_{i^*} , которая максимизирует взвешенный аддитивный критерий качества:

$$i^* = \operatorname{argmax}_{i=1,\dots,m} G_i(S_{t^*}, \omega) = \operatorname{argmax}_{i=1,\dots,m} \sum_{j=1}^{n=9} \omega_j \bar{K}_{ij}^{t^*}, \quad (2)$$

где ω_j – весовой коэффициент значимости j -го критерия; $\bar{K}_{ij}^{t^*}$ – нормализованное с использованием t^* -го метода значение j -го критерия по i -й альтернативе.

Определение весовых коэффициентов значимости критериев ω_j в (2) проводится по методу из [12]. Данный метод предполагает формирование матрицы весовых коэффициентов (с использованием количественных подходов), которой сопоставляется матрица рангов (качественный подход). Для получения заданного значения согласованности с помощью матрицы рангов решается задача бинарной оптимизации. Согласованность результатов (найденных ранговых значений весовых коэффициентов) оценивается с помощью коэффициента Кендалла W при заданном уровне значимости α . Расчет весовых коэффициентов значимости крите-

риев ω_j выполнялся для согласованности $W = 0,9$ при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ при помощи разработанного программного обеспечения [13].

Рис. 3. Значения альтернатив $A_1 - A_{24}$ по критериям $K_1 - K_9$ (соответственно а – и)

В качестве методов нормализации значений j -го критерия по i -й альтернативе в (1) использовались [14]: линейный по Вейтендорфу M_1 ; max-линейный M_2 ; линейный по сумме M_3 ; векторный M_4 ; логарифмический M_5 ; min-max-линейный M_6 ; min-max-нелинейный M_7 ; улучшенной точности M_8 ; Завадскаса и Турского M_9 . Выбор метода нормализации данных по предлагаемому подходу проводился при помощи разработанного программного обеспечения [15]. Расчет коэффициентов значимости $\gamma_1 - \gamma_9$ для методов $M_1 - M_9$ выполнялся для точности $\varepsilon = 0,001$ при начальных весовых коэффициентах значимости критериев ω от 0 до 1 с шагом 0,2.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

Рассчитанные весовые коэффициенты значимости критериев $K_1 - K_9$ показаны на рис. 4, а. Наибольшую значимость (0,193) имеет критерий K_4 , а наименьшую (0,029) – K_6 . Данные коэффициенты обладают согласованностью по коэффициенту Кендалла $W_{расч} = 0,911$ при полученном уровне значимости $\alpha_{расч} = 0,005$ с расчетной величиной 21,87 критерия χ -квадрат, превышающей табличное значение 15,5. Весовые коэффициенты значимости методов нормализации приведены на рис. 4, б.

Наибольшую значимость (0,134) имеют два метода нормализации – M_2 и M_6 . Данные коэффициенты получены на 2-й итерации при весовых коэффициентах значимости критериев от 0 до 1 с шагом 0,05. Для методов M_2 и M_6 нормализованные матрицы решений (см. рис. 3) показаны на рис. 5.

Каждый метод нормализации данных оказывает разное воздействие на исходные значения в матрице решений, что приводит к отличающимся нормализованным результатам. Полученные нормализованные матрицы решений с использованием найденных весовых коэффициентов значимости критериев (см. рис. 4) обеспечивают следующие значения взвешенного аддитивного критерия качества G , представленные на рис. 6.

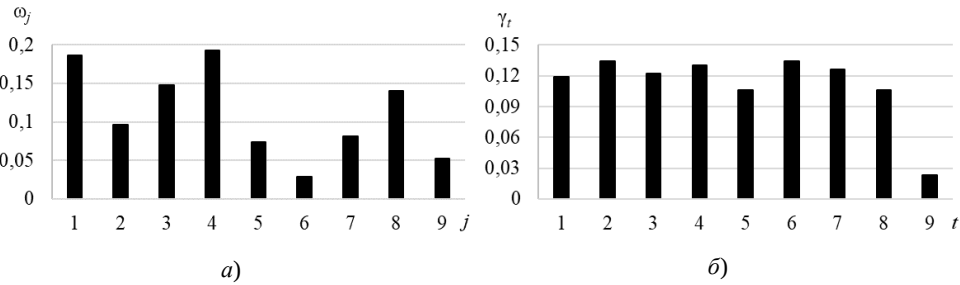


Рис. 4. Весовые коэффициенты значимости критериев (а) и методов нормализации (б)

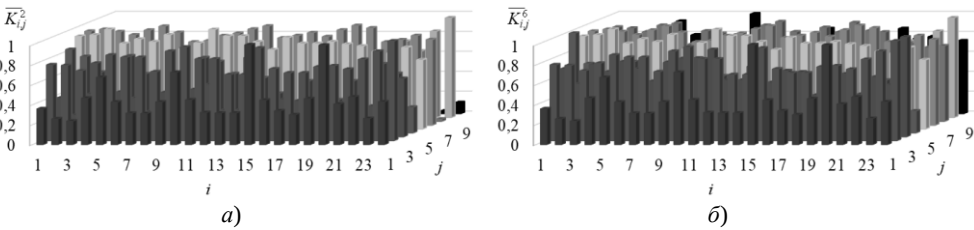


Рис. 5. Нормализованные матрицы решений по методам M_2 (а) и M_6 (б)

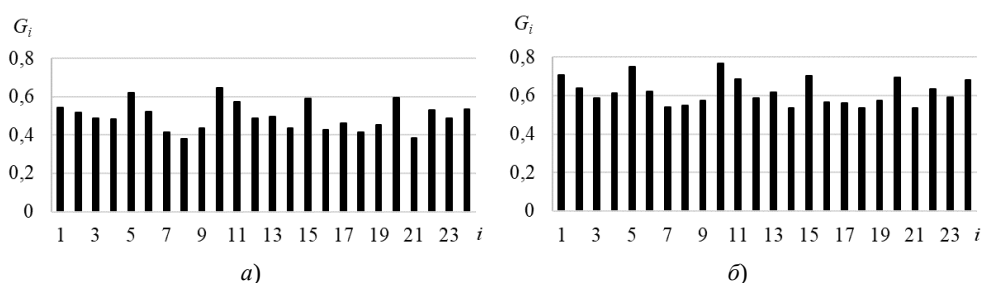


Рис. 6. Взвешенный аддитивный критерий качества, рассчитанный с использованием нормализованных матриц решений по методам M_2 (а) и M_6 (б)

Наибольшее значение аддитивного критерия в обоих случаях имеет альтернатива A_{10} , которая предполагает использование для гальванического процесса нанесения цинкового покрытия следующих параметров: концентрации цинка $C_{10,1} = 10$ г/л и гидроксида натрия $C_{10,2} = 110$ г/л; температура $t_{10} = 25$ °С; кислотность $pH_{10} = 4,2$; плотность тока $j_{10} = 1$ А/дм²; длительность процесса $T_{10} = 60$ мин. Таким образом, совпадение лучшей альтернативы свидетельствует о надежности и достоверности применения выбранных методов нормализации (M_2 или M_6) в контексте решения задачи (2) для имеющейся матрицы решений.

Заключение

Использование выбранных методов нормализации согласно предлагаемому подходу обеспечивает получение надежных и достоверных результатов. Данное обстоятельство способствует совершенствованию методологии принятия решений, обеспечивая систематический отбор и проверку применимости методов нормализации данных, используемых для выбора лучшей альтернативы. В свою очередь, полученные результаты закладывают основу для будущих исследований по применению предлагаемого подхода в целях совершенствования процессов принятия решений, а также подтверждения его обобщаемости и эффективности в различных областях человеческой деятельности.

Список литературы

1. Информационная поддержка принятия решений при проведении технологического обслуживания токарных станков / В. А. Немтинов, В. Ю. Бобылев, Ю. В. Немтинова, А. Б. Борисенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 220 – 229. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.220-229
2. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ поддержки принятия решений при проектировании сети общеобразовательных школ / В. Г. Мокрозуб, С. А. Рачкова, Ф. И. Вшивков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 3. С. 363 – 370. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.363-370
3. Евстифеев, А. А. Системный анализ поддержки принятия решений при развитии сети газовых заправочных станций / А. А. Евстифеев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 203 – 211. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.203-211
4. Формализация задачи поддержки принятия решений при управлении качеством функционирования структурного элемента деятельности в организационно-технической системе / К. А. Алейникова, В. Г. Мокрозуб, А. П. Рыжков, В. Е. Дидрих // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 376 – 386. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.376-386

5. Буракова, Е. А. Система поддержки принятия решений при производстве катализатора синтеза углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова, Е. Н. Туголуков, Т. П. Дьячкова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 187 – 198. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.187-198
6. Krishnan, A. R. Past Efforts in Determining Suitable Normalization Methods for Multi-Criteria Decision-Making: A Short Survey / A. R. Krishnan // *Frontiers in Big Data*. – 2022. Vol. 5 (990699). – P. 1 – 10. doi: 10.3389/fdata.2022.990699
7. Наумов, А. А. О неустойчивости метода нормализации критериев / А. А. Наумов, Р. И. Баженов // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 11-1 (43). – С. 64 – 68.
8. Зуга, И. М. Нормализация пространства критериев в задачах оптимизации схем расположения объектов производственных комплексов / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. – 2015. – № 1 (137). – С. 199 – 201.
9. Старовойтов, В. В. Нормализация данных в машинном обучении / В. В. Старовойтов, Ю. И. Голуб // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 83 – 96. doi: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96
10. Багутдинов, Р. А. Методы интеграции, уменьшение размеров и нормализация обработки разнородных и разномасштабных данных / Р. А. Багутдинов, М. Ф. Степанов // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 39 – 44.
11. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ РД IDEF0-2000. – М. : Госстандарт России, 2000. – 75 с.
12. 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
13. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2022665895. Определение весовых коэффициентов с заданной согласованностью в многокритериальных задачах принятия решений / Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 23 августа 2022 г.
14. Aytakin, A. Comparative Analysis of the Normalization Techniques in the Context of MCDM Problems / A. Aytakin // *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. – 2021. – Vol. 4 (2). – P. 1 – 25. doi: 10.31181/dmame210402001a
15. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2022682221. Оценка влияния методов нормализации критериев на результат задачи принятия решений / Д. С. Соловьев, Д. А. Саратов, И. А. Соловьева (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 21 ноября 2022 г.

Formalization of the Problem and Development of an Algorithm for Selecting a Data Normalization Method for Decision Making Support

D. S. Solovjev✉

*Department of Mathematical Modeling and Information Technologies,
solovjevdenis@mail.ru; Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

Keywords: choice of method; data normalization; making decisions; algorithm development; formalization of the task.

Abstract: One of the key problems of decision-making is the choice of an appropriate method of data normalization, which ensures their comparability and the possibility of subsequent analysis. The formalization of the problem and the

development of an algorithm for selecting a data normalization method for decision making are considered. The implementation of the proposed approach to choosing a data normalization method is demonstrated using the example of a decision-making problem to determine the best parameters for the galvanic process of applying zinc coating. The found solution confirms the receipt of reliable and reliable results using the selected normalization methods according to the proposed approach.

References

1. Nemtinov V.A., Bobylev V.Yu., Nemtinova Yu.V., Borisenko A.B. [Information decision making support for technological maintenance of lathes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 220-229. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.220-229 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Mokrozub V.G., Rachkova S.A., Vshivkov F.I. [System analysis of decision support in the design of a secondary school network], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 363-370. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.363-370 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Evstifeev A.A. [The system analysis of decision support in the development of a network of gas filling stations], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 203-211. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.203-211 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Aleinikova K.A., Mokrozub V.G., Ryzhkov A.P., Diedrich V.E. [Formalization of decision support in quality management of the structural element functioning in the organizational-technical system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 376-386. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.376-386 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Burakova E.A., Tugolukov E.N., Dyachkova T.P. [A decision support system for preparation of a catalyst for the synthesis of carbon nanotubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 187-198. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.187-198 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Krishnan A.R. Past efforts in determining suitable normalization methods for multi-criteria decision-making: A short survey, *Frontiers in Big Data*, 2022, vol. 5 (990699), pp. 1-10. doi: 10.3389/fdata.2022.990699
7. Naumov A.A., Bazhenov R.I. [About instability of normalization criteria method], *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii* [Modern scientific research and innovation], 2014, no. 11-1 (43), pp. 64-68. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zuga I.M., Khomchenko V.G. [Normalization of space criteria in optimization of process complex facilities layout targets], *Omskij nauchnyj vestnik*. [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 1 (137), pp. 199-201. (In Russ.)
9. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. [Data normalization in machine learning], *Informatika*. [Informatics], 2021, vol. 18, no. 3, pp. 83-96. doi: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Bagutdinov R.A., Stepanov M.F. [Methods of integration, reduction of sizes and normalization of processing of heterogeneous and multi-scale data], *International Journal of Open Information Technologies*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 39-44. (In Russ., abstract in Eng.)
11. *Metodologiya funkcional'nogo modelirovaniya IDEF0. Rukovodyashchij dokument RD IDEF0-2000* [Functional modeling methodology IDEF0. Guidance document RD IDEF0-2000], Moscow: Gosstandart Rossii, 2000, 75 p. (In Russ.)
12. Solovjev D.S. [The objectification method of the weight coefficients for decision-making in multicriteria problems], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal 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.)

13. Solovjev D.S., Solovjeva I.A. *Opređenje vesoých koefficientov s zadannoj soglasovannost'yu v mnogokriterial'nyh zadachah prinyatiya reshenij* [Determination of weighting coefficients with a given consistency in multicriteria decision-making problems], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of the computer program No. 2022665895. (In Russ.)

14. Aytekin A. Comparative Analysis of the Normalization Techniques in the Context of MCDM Problems, *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2021, vol. 4 (2), pp. 1-25. doi: 10.31181/dmame210402001a

15. Solovjev D.S., Saratov D.A., Solovjeva I.A. *Ocenka vliyaniya metodov normalizacii kriteriev na rezul'tat zadachi prinyatiya reshenij* [Assessing the influence of criteria normalization methods on the result of a decision-making problem], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of the computer program No. 2022682221. (In Russ.)

Formalisierung der Aufgabe und Entwicklung eines Algorithmus zur Auswahl der Normalisierungsmethode für Daten zur Entscheidungsfindung

Zusammenfassung: Eines der zentralen Probleme der Entscheidungsfindung ist die Wahl einer geeigneten Methode zur Datennormalisierung, die deren Vergleichbarkeit und die Möglichkeit der anschließenden Analyse gewährleistet. Betrachtet sind die Formalisierung des Problems und die Entwicklung eines Algorithmus zur Auswahl der Datennormalisierungsmethode für die Entscheidungsfindung. Die Umsetzung des vorgeschlagenen Ansatzes zur Auswahl der Datennormalisierungsmethode ist am Beispiel des Entscheidungsproblems zur Bestimmung der besten Parameter für den galvanischen Prozess des Aufbringens der Zinkbeschichtung demonstriert. Die gefundene Lösung bestätigt den Erhalt zuverlässiger und glaubwürdiger Ergebnisse unter Verwendung der ausgewählten Normalisierungsmethoden gemäß dem vorgeschlagenen Ansatz.

Formalisation de la tâche et développement d'un algorithme de choix de la méthode de normalisation des données pour la prise de la décision

Résumé: Un des principaux défis à relever dans la prise de la décision est le choix de d'une méthode appropriée de normalisation des données, qui assure leur compatibilité et leur analyse ultérieure. Sont examinés la formalisation de la tâche et le développement d'un algorithme pour choisir la méthode de normalisation des données pour la prise de la décision. Est démontrée la mise en œuvre de l'approche proposée pour le choix de la méthode de normalisation des données en prenant l'exemple de la tâche de la décision consistant à déterminer les meilleurs paramètres pour le processus de galvanoplastie du revêtement de zinc. La solution trouvée confirme l'obtention de résultats fiables et sûrs en utilisant les méthodes de normalisation sélectionnées selon l'approche proposée.

Автор: Соловьев Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое моделирование и информационные технологии», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

A FUZZY CONTROL MODEL OF AN INTELLIGENT INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF A DRUM DRYING UNIT

S. V. Artemova¹, M. A. Kamenskaya², P. I. Karasev¹✉,
N. S. Ershov¹, Vu Tri Chien³, A. A. Domornikova¹

Department KB-1 "Data Protection", karasev@mirea.ru (1);

Department KB-6 "Instruments and Information-Measuring Systems" (3),

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia;

Department of Power Engineering (2), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: Bayesian probability; fuzzy control model; linguistic variables; minimized functional; set of situations.

Abstract: This article discusses the models and methods underlying the functioning of the intelligent information-measuring and control system of a drum drying unit. They allow real-time minimization of losses in the quality of the dried material and the productivity of the drying process. A mathematical formulation of the problem of controlling the drying process with minimization of a given functionality and the structure of a drum drying installation as a control object are presented. Many possible control situations are described, linguistic variables are formulated, membership functions of terms of linguistic variables are determined, and a base of fuzzy control rules is formed. Examples of calculating the control action minimizing the loss functional, and the intelligent information-measuring and control system of the drum drying unit that implements it are shown.

Introduction

One of the important tasks of development of industrial facilities is considered to be the search for ways to improve the competitiveness of manufactured products. To solve the assigned goal, there are many industries, where a special place is occupied by the use of the latest information-measuring and control systems, including those containing elements of artificial intelligence [1].

Drying is a widespread process in various industries. Drying units are energy-intensive technological devices. Monitoring of indicators and making timely decisions on the management of the drying process has a significant impact not only on the quality of the dried material, but also on the energy performance of the entire production as a whole.

The specificity of automation of drying processes is determined by the peculiarities of dynamic properties of drying units as control objects: by state of the distribution of the parameters; by the multiplicity of the controlled and adjustable parameters, as well as the complexity of controlling the moisture content of the moving material and of the optimality criterion related to the quality of the product, the plant productivity and the economy of the drying process.

Drying units as control objects are usually nonlinear systems with distributed parameters. To control such objects it is necessary to solve systems of heat and mass transfer equations in real time, which is difficult in most cases. In this regard, these methods cannot be used in solving control optimization problems [1 – 4].

Therefore, we propose to use an information measuring and control system (IMCS) of the drum drying unit (DDU) when controlling the drying process in order to improve the competitiveness of the manufactured products.

Problem Statement

The presented peculiarity implies the possibility of regulating humidity by means of indirect methods, the presence of several factors of influence, as well as the complexity of functional criteria. The object of the study is a VetterTec GmbH unit, which belongs to the class of drying units with a shell and tube type drum, in which a drying after distillery stillage takes place.

In order to achieve the right level of product quality, it is important to solve the key problems of the correct choice of operation mode that will control the speed of rotation of the drum and the quality of the dried material. It is required to consider the key features of the unit and set a general task of its control and a number of tasks arising from it [5].

The general task should be understood as finding the optimal way of controlling the drying process using an IMCS. For this purpose, we must determine:

– the operator f affecting the degree of humidity of dried distillery stillage in a drum-type drying unit before and after the process performance $y = (y_1, \dots, y_p)^t$ and having a ratio with the value of the control action and vector function of perturbing influences $x = (x_1, \dots, x_n)^t$ in the flowing of various situations

$$f : T \times U \times X \times S \rightarrow Y, \quad (1)$$

where T , U is a generalized multitude of permissible values of the value of the control; X is a generalized multitude of perturbations' values; S is a generalized multitude of situations; Y is a generalized multitude of output data;

– the range of permissible values of output variables y , as well as the restrictions of the change of control actions t , u , i.e.

$$y_z \in Y_z^{\text{per}}, \quad z = \overline{1, p}; \quad (2)$$

$$t_i \in T_i^{\text{per}}, \quad i = \overline{1, h}; \quad u_j \in U_j^{\text{per}}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (3)$$

where $Y_z^{\text{per}}, T_i^{\text{per}}, U_j^{\text{per}}$ are the ranges of permissible values of y_z , t_i and u_j respectively;

– the determination of the optimality criterion, which is able to determine the degree of quality of the final product (Ql) and the level of productivity (Pr)

$$Q_{\min} = Q(\Delta Ql, \Delta Pr, u, t) \rightarrow \min_{u, t}, \quad (4)$$

where ΔQl , ΔPr are losses, which are determined by the drop of productivity or quality aspect of the dryable material.

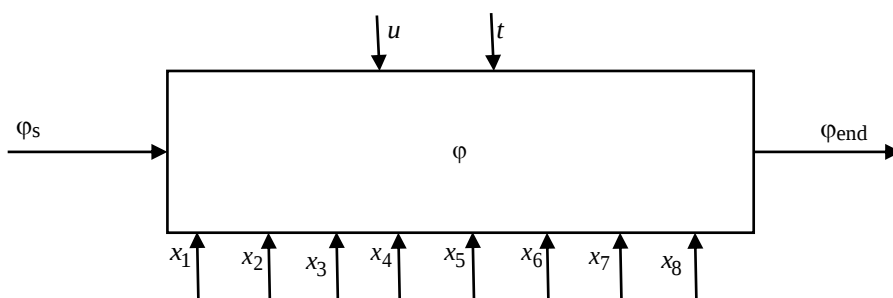


Fig. 1. Structure of the DDU as a control object

When performing calculations, it is important to identify such a value of the control action of u^* and t^* , when the restrictions specified in (2), (3) will be fulfilled, and criterion (4) is minimized [6].

The control is carried out by the engine rotations of the drum drying unit (Fig. 1).

Taking into account the direct dependence of losses on the direct control of processes, as well as the same interconnection between quality and ruling, the presented processes can be expressed through the criterion Q

$$Q = c_1(a_0 + a_1 u_0) + c_2(b_0 + b_1 u_0^2) + c_3(a_0 + a_1 t_0) + c_4(b_0 + b_1 t_0^2), \quad (5)$$

where c_1, c_2, c_3, c_4 are weight coefficients; a_0, a_1 are parameters of the process productivity losses function; b_0, b_1 are parameters of the final product quality losses function.

In the considered case, the multitude of situations S can be referred to the available trajectories of moisture content change along the length of the industrial equipment, that is, we can express $S(\cdot) = (\varphi_s, \varphi_{\text{end}})$.

The specified problem is determined by the solution based of primary information that allows us to determine the quality of the material at the input, the primary values of the control and the perturbations. From the mathematical point of view, the specified problem must be addressed for a certain batch of material (m), in this case the problem is specified as follows [2, 7]:

– a model of moisture content at the output of the DDU is formed

$$\varphi(t^m) = f(A, u, x), \quad (6)$$

where φ is the level of moisture content at the output; t^m is time interval, which determines the passage of material through the device; A is an aggregate of parameters of the neural network [2, 8], on the basis of which the moisture content is determined.

The perturbation vector x and control vector u are correlated with the following key components:

$$u = f(I); \quad (7)$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8), \quad (8)$$

where I is the current strength;

– the introduction of constraints (2), (3) on the control action and the variable φ , where U_j^{per} is an area of possible characteristics of the control action; Y_z^{per} is an area

of possible values of relative humidity; $Q_{\min}$ is a minimization of the functional (4). In general, the minimized functional is represented by formula (4).

To solve the control problems, we will use a complex analysis, which is based on the optimization of DDU operation. The key provisions should be considered taking into account the processes occurring in the DDU.

The solution of this problem is based on the use of real data obtained during the operation of the DDU in the production post-alcohol distillery stillage. The value of relative humidity of distillery stillage is determined by means of the developed method of its indirect measurement in the drum drying unit, providing the application of the created and trained neural network. At the inputs of the neural network, normalized values of signals are fed, received from the following primary measuring transducers: initial moisture content of distillery stillage; temperature of distillery stillage at the outlet; pressure, temperature, oxygen content of the coolant; power of exhaust fans, vented steam temperature, load of the electromotor, which have a significant impact on the drying process. From the output of the neural network, the value of relative humidity of the material is obtained [9, 10].

The vector of control variables at the output will be represented by the formula $y = [\varphi(t_m + m\Delta t), m(\varphi(t_m + (m)\Delta t))]$, at the same time possible trajectories should be applied depending on the situation arising after the realization of the control action, and values y_i from $\bar{y}_i$ are considered

$$S = \{s_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}, \quad (9)$$

where $\bar{y}_i$ is the optimized value of the material moisture level.

To simplify the process of working with the multitude of situations S , it is represented as a morphological table by introducing the following generalization for $s_l(\cdot) \in S$, which will be given by two components $s_l(\cdot) = (s_{l1}, s_{l2})$. For the latter components, there is an assumption which assumes the presences of only five values for s_{l1} and three for s_{l2} :

$$s_{li} = \begin{cases} s_{li}^{\text{LOW}}, & \text{if } y_i < 0.65; \\ s_{li}^{\text{AVG}}, & \text{if } y_i \in [0.65; 0.8]; \\ s_{li}^{\text{HIGH}}, & \text{if } y_i > 0.8, i = 2, \end{cases} \quad (10)$$

$$s_j = \begin{cases} s^{\text{CBPL}}, & \text{if } y < 2; \\ s^{\text{BPL}}, & \text{if } y \in [1.5; 3.5]; \\ s^{\text{P}}, & \text{if } y \in [2.5; 4.5]; \\ s^{\text{APL}}, & \text{if } y \in [4; 6]; \\ s^{\text{SAPL}}, & \text{if } y > 5. \end{cases} \quad (11)$$

The system under consideration will have several variants of solutions depending on the situation $s_j(\cdot) \in S$. Under the condition of realization of the control development $u(s_j(\cdot))$, in which the control device carries out the performance of the tasks related to the productivity and quality of the products received [11]. This means that $y \in Y^{\text{per}}$ will be within the limits of the transit time of the work pieces through the drying unit. In this case, the multitude of situations will fulfill the condition of includability under which the expression $\forall s_j(\cdot) \in S$ is true.

As for the calculation of $\tilde{u}_0(t)$, it should be realized through the formula

$$\tilde{u}_0(t) = \begin{cases} f(y(t); \bar{u}_0), & \tilde{u}_0 \in [u_0^{\text{LOW}}; u_0^{\text{HIGH}}]; \\ u_0^{\text{LOW}}, & \tilde{u}_0 < u_0^{\text{LOW}}; \\ u_0^{\text{HIGH}}, & \tilde{u}_0 > u_0^{\text{HIGH}}. \end{cases} \quad (12)$$

In our case S corresponds to fifteen $L = 15$ situations of different types. Each row of the tabular representation defines the gradation of the importance of the components for the final batch of products dried in different time periods.

Let's introduce the following designations of fuzzy variables: CBPL – the level of humidity and temperature of the material is considerably below the permissible level; BPL – humidity and temperature correlate with the level below the permissible level; P – the level of humidity and temperature is within the permissible ranges (the level is permissible); APL – humidity correlates with the level above the permissible level; SAPL – the level of humidity and temperature is significantly above the permissible limits.

Let's formulate the problem of drum speed control as follows. The moisture content of the material at the input of the drying unit, the permissible ranges of their variation and the Bayesian probability of achieving the required quality of the material at the output of the drying unit are known. It is required to determine the rotational speed of the DDU drum at which the required necessary quality of the used material at the outlet of the unit will be achieved with the maximum possible efficiency of the drying process.

A Fuzzy Control Model of the Rotation Speed of a Drum of the Drying Unit

One of the stages of creating a control algorithm is the description of input and output variables of the problem in the form of linguistic variables. The input variable represents by $\varphi(t_0 + \Delta t)$, which correlates with the moisture content of the material, and also by $P(\varphi(t_0 + \Delta t))$, which is a probabilistic value of achieving the required parameter of humidity content at the output. The output linguistic variable is the change of the rotation speed of the drum $\Delta\tilde{u}_0(t_0 + \Delta t)$.

The use of a fuzzy control model becomes the basis for faster achievement of the required level of quality characteristics, as well as for the achievement of a high level of resource saving at various adjustments and changes in the technological process [3, 12]. Let us consider the formalization of the task: the control of the rotation speed of the drum.

The control process is technologically defined on the basis of changes in the speed parameters of rotation of the mobile part of the unit using a fuzzy multitude which regards the value of the humidity content of the material φ .

As linguistic variables are used: “Material humidity content”, “Drum rotation speed”. The names of terms and the values of fuzzy variables are presented in the Tables 1 – 3. The table 1 specifies the appropriate range of the value of the term $T(\varphi)$. A signal of the speed rotation to control of the drum is generated, based on the values of the term $T(v_d)$.

Table 1

Estimation of the moisture content of the material used in the dryer

Number of the term	Name of the term, $T(\varphi, t)$	Fuzzy variable, %
1	CBPL	$1/0 + 1/1 + 0/2$
2	BPL	$0/1,5 + 1/2.5 + 0/3.5$
3	P	$0/2,5 + 1/3.5 + 0/4.5$
4	APL	$0/4 + 1/5 + 0/6$
5	SAPL	$0/5 + 1/7 + 1/100$

Table 2

Terms and values of the probability of achieving the required humidity at the outlet of the dryer

Number of the term	Name of the term, $T(P(\varphi))$	Fuzzy variable, %
1	LOW	$1/0 + 1/0.575 + 0/0.675$
2	AVG	$0/0.575 + 1/0.675 + 1/0.725 + 0/0.825$
3	HIGH	$0/0.725 + 1/0.825 + 1/1$

Table 3

Drum rotation speed v_d

Number of the term	Name of the term, $T(v_d)$	Fuzzy variable, %
1	SDDR	$1/-3 + 1/-2 + 0/-1.7$
2	DDR	$0/-2 + 1/-1.2 + 0/-0.4$
3	N	$0/-0.7 + 1/0 + 0/0.7$
4	IDR	$0/0.4 + 1/1.2 + 0/2$
5	SIDR	$0/1.2 + 1/2.1 + 1/3$

Note: The following linguistic variables are used here SDDR – strongly decrease the drum rotation speed; DDR – decrease the drum rotation speed; N – leave the drum rotation speed unchanged; IDR – increase the drum rotation speed; SIDR – strongly increase the drum rotation speed.

In order to achieve the control objective, a knowledge base consisting of the following fuzzy rules is formed considering the set of S , and the names of the terms of linguistic variables:

1. If $T(\varphi, t) = \text{CBPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{LOW}$, then $T(v_d) = \text{SIDR}$;
2. If $T(\varphi, t) = \text{BPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{LOW}$, then $T(v_d) = \text{SIDR}$;
3. If $T(\varphi, t) = \text{P}$ and $T(P(\varphi)) = \text{LOW}$, then $T(v_d) = \text{IDR}$;
4. If $T(\varphi, t) = \text{APL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{LOW}$, then $T(v_d) = \text{IDR}$;
5. If $T(\varphi, t) = \text{SAPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{LOW}$, then $T(v_d) = \text{DDR}$;
6. If $T(\varphi, t) = \text{CBPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{AVG}$, then $T(v_d) = \text{SIDR}$;
7. If $T(\varphi, t) = \text{BPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{AVG}$, then $T(v_d) = \text{SIDR}$;

8. If $T(\varphi, t) = P$ and $T(P(\varphi)) = \text{AVG}$, then $T(v_d) = N$;
9. If $T(\varphi, t) = \text{APL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{AVG}$, then $T(v_d) = \text{IDR}$;
10. If $T(\varphi, t) = \text{SAPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{AVG}$, then $T(v_d) = \text{DDR}$;
11. If $T(\varphi, t) = \text{CBPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{HIGH}$, then $T(v_d) = \text{SIDR}$;
12. If $T(\varphi, t) = \text{BPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{HIGH}$, then $T(v_d) = \text{SIDR}$;
13. If $T(\varphi, t) = P$ and $T(P(\varphi)) = \text{HIGH}$, then $T(v_d) = \text{IDR}$;
14. If $T(\varphi, t) = \text{APL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{HIGH}$, then $T(v_d) = \text{IDR}$;
15. If $T(\varphi, t) = \text{SAPL}$ and $T(P(\varphi)) = \text{HIGH}$, then $T(v_d) = \text{DDR}$.

Let us consider the steps of the proposed method for controlling the drying process in the DDU:

1. The initial moisture content of the m^{th} batch of material $\varphi_{in}(t_0^m)$ is measured.
2. The values of components of the vector of perturbing x values of control actions u in the process of drying the m^{th} batch of material in the DDU corresponding to the moment of time $t_0^m + \Delta t$ are measured. The calculation of the moisture content of the material in the DDU $\varphi(t_0^m + \Delta t)$ is being made using a model based on a neural network.
3. A verification of the calculated moisture content of the material $\varphi(t_0^m + \Delta t)$ is being performed to find whether it is entering within the permissible range, and the drying process is being corrected if necessary.
4. The probabilistic values of $P(\varphi_k(t_0^m + \Delta t))$ are determined when the process takes place in the m^{th} batch directly at the DDU outlet using the obtained values of material moisture content, taking into account $\varphi(t_0^m + \Delta t)$, calculated by the Bayesian method.
5. A recalculation of the control action is carried out in a given range of $\tilde{u}_0 \in U_0^{\text{per}}$ with the involvement of fuzzy logic model. In this case, the Mamdani algorithm is used, which involves determining the value of the rotation speed. The numeric value can be obtained using the methods of:
 - 1) centre of gravity;
 - 2) calculation of median;
 - 3) centre of maximum.
6. The optimal control action is selected taking into account the functional

$$Q = c_1(a_0 + a_1 u_0) + c_2(b_0 + b_1 u_0^2) + c_3(a_0 + a_1 t_0) + c_4(b_0 + b_1 t_0^2). \quad (13)$$

The method presented above becomes the basis for controlling the production process in the DDU, which provides quality control of the final product, as well as the efficiency of the technological process depending on changes in the operation [4].

Let us consider the application of calculations using the centre of gravity method. Fuzzy regions for input values are shown in Figs. 2 – 4.

Graphs of the membership functions of terms of linguistic variables have been constructed.

Figure 5 shows the result obtained using the *center of gravity method*. If the moisture content is 3.53 and the probability of achieving the required quality is 0.468, then the speed = 1.2.

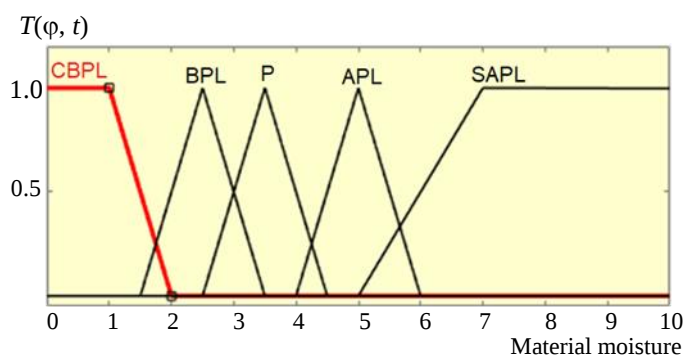


Fig. 2. Fuzzy regions of material moisture values

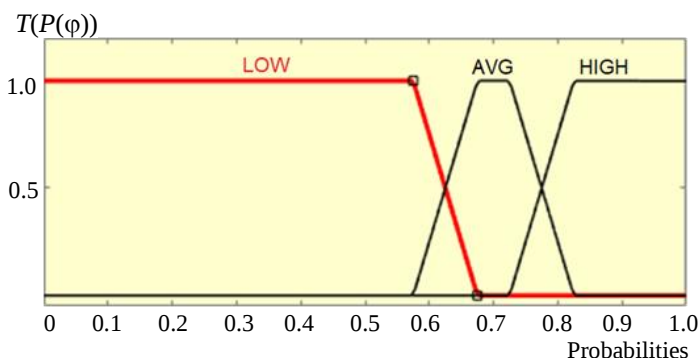


Fig. 3. Fuzzy regions of Bayesian probability to reach the required humidity at the output

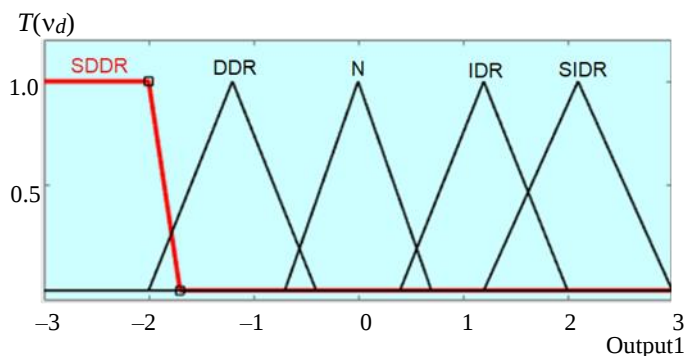


Fig. 4. Fuzzy regions of drum rotation speed values

Thus by changing the rotational speed of the drum of the drying unit by 1.2 m/s, a minimization of the quality loss of the manufactured products and the productivity of the drying process by 8 % is achieved.

The operation of the DDU is characterized by three modes - heating, stabilization, drying. Moreover, the first two modes are considered as dynamic, and the third as static. The structural diagram of the IMCS is shown in Fig. 6.

The production processes control system (PPCS), which includes the IMCS, consists of two main subsystems: information-measuring system (IMS) and information-control system (ICS), each one of which fulfills the function of measurement and control, respectively.

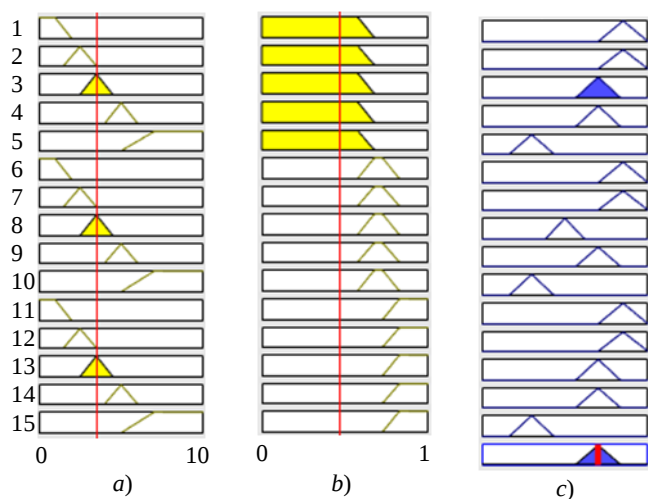


Fig. 5. Result obtained using the Centre of gravity method
 a – material moisture = 3.53; b – probabilities = 0.468; c – output1 = 1.2

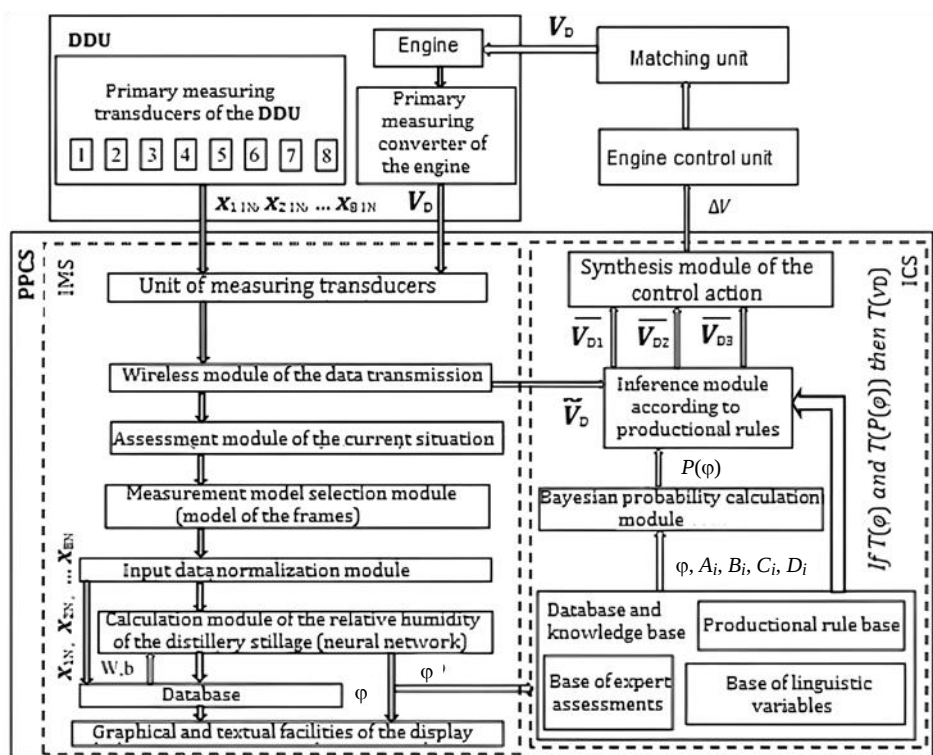


Fig. 6. Structure diagram of the system

Description of the IMCS

The system includes several modules and an aggregate of primary measuring transducers of technological parameters of the drying process. The main modules of the IMCS include: the module of normalized input variables, the module of measurement model selection, the module of calculation of relative humidity of distillery stillage [3],

the module of the syntheses of the control actions, the inference module according to production rules, and the module of Bayesian probability calculation. Also, the IMCS contains databases and knowledge, graphical and textual means of information display.

The collected data are fed into the module of normalized input variables, which converts them into normalized values to ensure their compatibility with the inputs of the trained neural network.

Next, the data are processed in the measurement model selection module, which determines the optimal moisture measurement model depending on material parameters and other factors. Then they are transferred to the moisture calculation module, which performs a non-contact indirect measurement of material moisture in real time using normalized signals received from multiple sensors.

The obtained estimate of material moisture content is used to control the drying process with the help of an ICS, which works on the basis of production rules and Bayesian probability theory. The synthesis module of the control actions is designed to minimize the expense functional. It calculates optimized control inputs that change the speed of rotation of the drum in order to achieve the required moisture content of the material at the exit without losing the performance of the drying process.

All data obtained during the operation of the IMS and ICS are stored in a database for further analysis and use. The database includes information on technological parameters of the drying process, results of material moisture measurement, and forecasts of achieving the required moisture content, expert estimates and production rules.

For the convenience of analyzing and using the data, IMS and ICS provide graphical and textual means of displaying information. They can be used by operators to monitor and control the drying process and to analyze and optimize the production.

The IMCS blocks are also a frame-based knowledge base (**KB**). The KB contains knowledge about the technological process in the form of frames. Using them, the execution of algorithms is being carried out.

The knowledge base is the most important component of the control system, as it contains the technical information required for the execution of analysis and synthesis system in order to optimize the control according to specified criteria. The knowledge is represented here in the form of two types: declarative and procedural knowledge. The procedural knowledge include rules, procedures, operations, algorithms that define actions to implement the mechanism of inference when solving control problems for situations arising as a result of the functioning of the system. The declarative knowledge is a description of objects, elements, phenomena, connections, relations between elements and phenomena.

The form of knowledge representation significantly affects the IMCS characteristics. The knowledge representation in the control system is performed with frame component, semantic networks, as well as using logical models of knowledge, neural networks, Bayesian probability and fuzzy models.

Generally, the system operates without the involvement of a decision maker and provides real time indirect measurement of material moisture content and drying process management in order to minimize product quality losses and to increase productivity.

Conclusion

In order to minimize the losses of the product quality and productivity of their manufacturing process, a multitude of possible situations has been defined, linguistic variables have been introduced, Bayesian probabilities have been calculated, linguistic variables terms values have been determined, and a knowledge base including linguistic rules, frame models, and neural networks has been formed.

The technical realization of the IMCS contains two subsystems: the IMS and the ICS. At the heart of the IMS functioning are the models describing the drying process in the mode of the real time having the form of neural networks trained by the method of error back propagation, and the frame model taking into account the failures of primary measuring transducers, which allows estimating the moisture content of the material in the drying process.

Models and methods used in the construction of the created system allow it to function without the participation of a decision maker, which makes it intelligent. The use of the IMCS of the drum drying unit makes it possible to control the process of drying of post-alcoholic distillery stillage in real time with a minimum loss of such important indicators as the quality of manufactured products and productivity of the process of its production.

References

1. Lykov M.V. *Sushka v khimicheskoy promyshlennosti* [Drying in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1970, 432 p. (In Russ.)
2. Artemova S.V., Vu Chi Chiyen, Kamenskaya M.A. *Sposob otsenki vlazhnosti materiala v protsesse sushki v barabannoy sushil'noy ustanovke* [A method for assessing the moisture content of a material during drying in a drum drying installation], Russian Federation, 2022, Pat. № 2766517 (In Russ.)
3. Artemova S.V., Ladynin A.I., Shmeleva A.G., Vu Tri Chien, Kamenskaia M.A., Ryabchik T.A. Technological Processes Operational Assessment Frame Model in Automated Control Systems, *Proc. of IV International Conference on Control in Technical Systems*, St. Petersburg, 21-23 September 2021. St. Petersburg, 2021, pp. 27-29. doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562783
4. Radharani M., Gopinath N., Sandeep P., Jagadeesh M. Object Detection with SSD and MobileNet, *International Journal for Recent Developments in Sciences and Technologies*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 40-51. available at: <https://ijrdst.org/public/uploads/paper/362391681399621.pdf> (accessed 15 January 2024).
5. Pavlidis T. *Algoritmy mashinnoy grafiki i obrabotki izobrazheniy* [Algorithms for computer graphics and image processing], Moscow: Radio i svyaz', 1986, 804 p. (In Russ.)
6. Kumar A., Zhang J., Lyu H. Object Detection in Real Time Based on improved Single Shot Multi-Box Detector Algorithm, *Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, no. 204. doi: 10.1186/s13638-020-01826-x
7. [Image segmentation]: TensorFlow Core. available at: <https://www.tensorflow.org/tutorials/images/segmentation> (accessed 15 January 2024).
8. Borgi A., Akdag H. Knowledge Based Supervised Fuzzy-Classification: An Application to Image Processing, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, no. 32 (1-4), pp. 67-86. doi: 10.1023/A:1016753214357
9. Vasil'yev K.K., Krashennikov V.R. *Statisticheskii analiz mnogomernykh izobrazheniy* [Statistical analysis of multidimensional images], Ul'yanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2007, 170 p. (In Russ.)
10. Ince T. Unsupervised Classification of Polarimetric SAR Image with Dynamic Clustering: An Image Processing Approach, *Advances in Engineering Software*, 2010, vol. 41, no. 4, pp. 636-646. doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.12.004
11. Vinogradov S.Yu. [Component model of fuzzy clustering based on the c-means algorithm], *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT*

[Mathematical methods in engineering and technology – MMTT], 2014, no. 6(65), pp. 111-113. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Borovik V.S., Shidlovskiy S.V. *Innovatika-2017: sbornik materialov XIII Mezhdunar. shkoly-konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Innovatika-2017: collection of materials of the XIII International. schools-conf. students, graduate students and young scientists], Tomsk, 20-22 April 2017, Tomsk, 2017, pp. 392-395. (In Russ., abstract in Eng.)

Нечеткая модель управления интеллектуальной информационно-управляющей системы барабанной сушильной установки

**С. В. Артемова¹, М. А. Каменская², П. И. Карасев¹✉,
Н. С. Ершов¹, Ву Чи Чиен³, А. А. Доморникова¹**

*Кафедры: КБ-1 «Защита информации», karasev@mirea.ru (1);
КБ-6 «Приборы и информационно-измерительные системы» (3),
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия;
кафедра «Электроэнергетика» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: Байесовская вероятность; лингвистические переменные; минимизируемый функционал; множество ситуаций; нечеткая модель управления.

Аннотация: Рассмотрены модели и методы, лежащие в основе функционирования интеллектуальной информационно-управляющей системы (ИИУС) барабанной сушильной установкой (БСУ). Они позволяют в реальном режиме времени минимизировать потери качества высушиваемого материала и производительность процесса его сушки. Приведены математическая постановка задачи управления процессом сушки с минимизацией заданного функционала и структура барабанной сушильной установки как объекта управления. Дано описание множеств возможных ситуаций управления, сформулированы лингвистические переменные, определены функции принадлежности термов лингвистических переменных, сформирована база нечетких правил управления. Показаны пример расчета управляющего воздействия, минимизирующего функционал потерь и ИИУС БСУ его реализующей.

Список литературы

1. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 432 с.
2. Пат. № 2766517 С1 РФ, МПК F26B 25/22. Способ оценки влажности материала в процессе сушки в барабанной сушильной установке / Артемова С. В., Ву Чи Чиен, Каменская М. А. ; заявитель ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет». – № 2021112482 ; заявл. 29.04.2021; опубл. 15.03.2022, Бюл. № 8. – 12 с.
3. Technological Processes Operational Assessment Frame Model in Automated Control Systems / S. V. Artemova, A. I. Ladynin, A. G. Shmeleva, Vu Tri Chien, M. A. Kamenskaia, T. A. Ryabchik // Proc. of IV International Conference on Control

in Technical Systems, St. Petersburg, 21 – 23 September 2021. St. Petersburg, 2021. – P. 27 – 29. doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562783

4. Object Detection with SSD and MobileNet / M. Radharani, N. Gopinath, P. Sandeep, M. Jagadeesh // International Journal for Recent Developments in Sciences and Technologies. – 2023. – Vol. 7, No. 2. – P. 40 – 51. – URL: <https://ijrdst.org/public/uploads/paper/362391681399621.pdf> (дата обращения: 15.01.2024).

5. Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис. – М. : Радио и связь, 1986. – 804 с.

6. Kumar, A. Object Detection in Real Time Based on improved Single Shot Multi-Box Detector Algorithm /A. Kumar, J. Zhang, H. Lyu // Journal on Wireless Communications and Networking. – 2020. No. 204. doi: 10.1186/s13638-020-01826-x

7. Сегментация изображения: TensorFlow Core. – Текст: электронный. – URL: <https://www.tensorflow.org/tutorials/images/segmentation> (дата обращения: 15.01.2024).

8. Borgi, A. Knowledge Based Supervised Fuzzy-Classification: An Application to Image Processing / A. Borgi, H. Akdag // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. – 2001. – No. 32 (1-4). – P. 67 – 86. doi: 10.1023/A:1016753214357

9. Васильев, К. К. Статистический анализ многомерных изображений / К. К. Васильев, В. Р. Крашениников. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 170 с.

10. Ince, T. Unsupervised Classification of Polarimetric SAR Image with Dynamic Clustering: An Image Processing Approach / T. Ince // Advances in Engineering Software. – 2010. – Vol. 41, No. 4. – P. 636 – 646. doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.12.004

11. Виноградов, С. Ю. Компонентная модель нечеткой кластеризации на основе алгоритма с-средних / С. Ю. Виноградов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – № 6(65). – С. 111 – 113.

12. Боровик, В. С. Распознавание образов на цифровых изображениях с помощью гистограмм направленных градиентов / В. С. Боровик, С. В. Шидловский // Инноватика-2017 : сб. материалов XIII Междунар. школы-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 20 – 22 апреля 2017 г. – Томск, 2017. – С. 392 – 395.

Fuzzy-Control-Modell des intelligenten Informations-Mess- und Steuersystems der Trommel-Trocknungsanlage

Zusammenfassung: In diesem Artikel sind Modelle und Methoden betrachtet, die der Funktionsweise des intelligenten Informationsmess- und Steuerungssystems (IISS) der Trommeltrocknungsanlage (TTA) zugrunde liegen. Sie ermöglichen die Echtzeitminimierung von Verlusten bei der Qualität des getrockneten Materials und der Produktivität des Trocknungsprozesses. Es sind die mathematische Formulierung des Problems der Steuerung des Trocknungsprozesses unter Minimierung der gegebenen Funktionalität und der Aufbau einer Trommeltrocknungsanlage als Steuerungsobjekt vorgestellt. Es sind viele mögliche Kontrollsituationen beschrieben, linguistische Variablen formuliert, Zugehörigkeitsfunktionen von Termen linguistischer Variablen bestimmt und die Basis von Fuzzy-Kontrollregeln gebildet. Es sind Beispiele für die Berechnung der Steuerwirkung zur Minimierung der Verlustfunktion sowie das intelligente Informationsmess- und Steuersystem der Trommeltrocknungseinheit gezeigt, das diese Funktion umsetzt.

Modèle de la commande flou d'un système intelligent d'information et de contrôle d'une installation de séchage à tambour

Résumé: Sont examinés les modèles et les méthodes qui sous-tendent le fonctionnement du système intelligent d'information et de contrôle (SIIC) d'une unité de séchage à tambour (UST). Ils permettent, en temps réel, de minimiser les pertes de qualité de la matière séchée et de productivité du processus de séchage. Sont présentées la formulation mathématique du problème de la commande du processus de séchage avec minimisation d'une fonctionnalité donnée et la structure d'une installation de séchage à tambour en tant qu'objet de contrôle. Sont décrites de nombreuses situations de la commande possible; sont formulées des variables linguistiques; sont déterminées des fonctions d'appartenance aux termes des variables linguistiques; est formée une base de règles de contrôle floues. Sont présentés un exemple de calcul d'une action de commande qui minimise la perte fonctionnelle et un système automatisé pour le système de commande qui la met en œuvre.

Авторы: *Артемова Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, заведующий кафедрой КБ-1 «Защита информации», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия; *Каменская Мария Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Карасев Павел Игоревич* – кандидат технических наук, доцент кафедры КБ-1 «Защита информации»; *Ершов Никита Сергеевич* – преподаватель кафедры КБ-1 «Защита информации»; *Ву Чи Чие* – аспирант кафедры КБ-6 «Приборы и информационно-измерительные системы», институт кибербезопасности и цифровых технологий; *Доморникова Анна Александровна* – студент, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия.

К ВОПРОСУ ФОРМАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

И. А. Глазкова, М. А. Ивановский✉, Б. Х. М. Эль Эиссави

*Кафедра «Информационные системы и защита информации»,
ivanovskiy_62@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: декомпозиция алгоритмов распознавания; информационная система; лингвистическая лотерея; система распознавания образов; сложная система; тезаурус; формализация функционирования.

Аннотация: Для одноуровневых систем распознавания образов предложено рассматривать поиск вектора признаков как модель распределенной информационной системы на тезаурусе. Для многоуровневых сложных систем распознавания предложен способ декомпозиции, который связан с включением в процесс распознавания специалиста-аналитика данных. При формальном описании системы распознавания на этапе синтеза образов учтены возможные неточности значений показателей из-за вероятностного характера величин, входящих в показатели, использована лингвистическая лотерея, аддитивная свертка показателей при нечеткой исходной информации.

Введение

В настоящее время имеется тенденция к созданию универсальных многопрофильных междисциплинарных центров распознавания образов, функционирующих как в экспресс-режиме, так и режиме углубленного анализа, что связано с экономией аппаратных и программных ресурсов, поскольку современные информационные системы и технологии включают в себя большое количество типовых процедур, моделирующих или поддерживающих процесс интеллектуального анализа данных.

К простейшим процедурам такого типа относится любая классификация количественных данных по заданным пользователем критериям. Более сложные обеспечивают анализ сцен, процессов, явлений в целях выделения объектов с заданными характеристиками или свойствами, присутствуют не только в задачах анализа изображений, но и при обработке сигналов в технических системах, медицинской диагностике, биологии, социологии и других областях человеческой деятельности.

Декомпозиция системы распознавания образов

В многоуровневых сложных системах распознавания важен способ декомпозиции, который обычно связан с моментами включения в процесс распознавания специалиста-аналитика данных, то есть с интерактивным режимом обработки из-за неполноты исходной информации или трудностей ее формального описания на этапе синтеза образов [1, 2].

В одноуровневых системах распознавание осуществляется на основе одного словаря признаков одним алгоритмом распознавания, что фактически приводит к поиску на тезаурусе, результатом может служить документ с вектором признаков.

Рассмотрим модель распределенной информационной системы на тезаурусе.

Тезаурус – словарь, отражающий смысловые связи между словами и иными смысловыми элементами и, следовательно, предназначенный для поиска слов по их смыслу. Тезаурусом называется непустое множество V слов v , отвечающих условиям:

- имеется непустое подмножество $V_0 \subset V$, называемое множеством дескрипторов;
- имеется симметричное транзитивное рефлексивное отношение $R \subset V \times V$, такое, что:

$$v_1 \neq v_2 \cap v_1 R v_2 \Rightarrow (v_1 \in V \setminus V_0) \cup (v_1 \in V \setminus V_0);$$

$$v_1 \in V \setminus V_0 \Rightarrow (\exists v \in V_0)(v R v_1);$$

- имеется транзитивное и несимметричное отношение $K \subset V_0 \times V_0$, называемое обобщающим отношением.

Отношение R называется *синонимическим отношением*, слова v_1 и v_2 , отвечающие этому отношению, называются *синонимическими дескрипторами*.

В случае, если два дескриптора v_1 и v_2 удовлетворяют отношению $v_1 K v_2$, полагается, что дескриптор v_1 более общий, чем дескриптор v_2 .

Элементы множества $V \setminus V_0$ называются *множеством аскрипторов*.

Информационно-поисковый тезаурус позволяет находить нужные дескрипторы для адекватного выражения информационной потребности.

Дескриптор служит для описания основного содержания документа или формулировки информационного запроса при поиске документов в информационно-поисковой системе. Дескриптор ставится в однозначное соответствие группе ключевых слов естественного языка, отобранных из текста определенной области знания для построения дескрипторного языка [3].

Информационной системой с тезаурусом называется четверка (V, D, M, δ) , где V – тезаурус с дескриптивным множеством V_0 ; D – коллекция документов; M – множество вопросов; $\delta: M \rightarrow 2D$ – отображение, сопоставляющее каждому вопросу множество документов.

Пусть описание любого документа $d \in D$ может быть представлено в виде $v(d) = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ и удовлетворяет условию: никакие два дескриптора не встречаются в одном $v(d)$, если они удовлетворяют отношению K .

Можно также считать, что каждый вопрос $m \in M$ представлен в форме, аналогичной описанию документов. Множество описаний вопросов и документов частично упорядочено отношением включения $\leq$ следующим образом $\forall d_1, d_2 \in D$:

$$v(d_1) < v(d_2) \Leftrightarrow (\forall v' \in v(d_1)) \times (\exists v'' \in v(d_2)) (v' K v'') \vee (d' = d''),$$

то есть каждый дескриптор из $v(d_1)$ представляет собой обобщение дескриптора из $v(d_2)$ или идентичен дескриптору из $v(d_2)$. Отношение $\leq$ позволяет сформулировать ответ Q на вопрос $m \in M$ в виде $Q = \delta(m) = \{d : d \in D \wedge m \leq x(d)\}$.

Пусть $S_1, S_2, \dots, S_n$ – локальные информационные системы, где $S_j = (V_j, D_j, M_j, \delta_j)$, $j = 1, n$. Соединим системы $S_1, S_2, \dots, S_n$ в одну систему S , которую будем называть *распределенной информационной системой*, базирующейся на глобальном тезаурусе $V = \bigcup V_j$.

Пусть имеется распределенная информационная система $S = (V, D, M, \delta)$ с синонимическим отношением R_n , обобщающим отношением K . Тогда последова-

тельность информационных систем можно определить следующим образом: $S_j = (V_j, D_j, M_j, \delta_j)$, где $V_j \subset V$; $D_j \subset D$; $M_j \subset M$; δ_j – сужение δ на M_j ; $j = \overline{1, n}$.

Кроме того, отношения $R_j = R \cap (V_j \times V_j)$ и $K_j = K \cap (V_{0j} \times V_{0j})$; V_{0j} – множество дескрипторов системы S_j ; отношение предпочтения $j \leq (M_j \times M_j)$; $\forall m \in M_j \delta_j(m) = \{d : d \in D_j \wedge m \leq j_v(d)\}$.

Определим понятие подсистемы, которое позволит формализовать отношение включения одной системы в другую. Пусть $S_1 = (V_1, D_1, M_1, \delta_1)$ и $S_2 = (V_2, D_2, M_2, \delta_2)$ – информационные системы. Система S_1 является подсистемой S_2 , $S_1 \subset S_2$, если:

$$(V_1 \subset V_2) \wedge (K_1 = K_2 \cap (V_{01} \times V_{02})) \wedge (R_1 = R_2 \cap (V_{01} \times V_{02}));$$

$$D_1 \subset D_2; (V_1 \subset V_2) \wedge \leq 2 \cap (M_j \times M_j);$$

$$\delta_1(m) = \delta_2(m_2) \cap D_1; m \in M_1.$$

Локальные информационные системы – подсистемы распределенной информационной системы.

Ввиду того что множество документов распределенной системы – это объединение множеств документов локальных систем, можно выразить ответ на вопрос к распределенной системе как результат некоторых операций над ответами от локальных систем. Пусть $\bar{m} = \{m\}$ – вопрос, содержащий один дескриптор, $\delta(\bar{m})$ – ответ на вопрос m . В подсистеме S_i ответ на локальный вопрос $\bar{m} = \{m\}$ описывается в следующей форме

$$\delta_j(m) = \{d : d \in D_j \wedge j_v(d)\}.$$

В свою очередь, в распределенной системе S глобальный ответ на вопрос $\bar{m} = \{m\}$ будет объединением локальных ответов $\delta(\bar{m}) = \bigcup_j \delta_j(\bar{m})$.

Ответ на произвольный вопрос $\bar{m} = \{m_1, \dots, m_k\}$ в распределенной системе выражается формулой $\delta(\bar{m}) = \bigcap_{i=1}^k \delta(\bar{m}_i)$, $\bar{m}_i = \{m_i\}$.

Распределенная информационная система обладает свойством включения, если множество вопросов частично упорядочено отношением $\leq$ и выполняется условие

$$\{\bar{m}_1, \bar{m}_2\} \subset M \wedge \bar{m}_1 \leq \bar{m}_2 \Rightarrow \delta(\bar{m}_1) \supset \delta(\bar{m}_2).$$

Свойства включения позволяют формулировать цепь ответов на цепь вопросов, уточняя ответы более специализированными вопросами. В некоторых случаях при выполнении свойства аддитивности операции над ответами локальных систем могут быть упрощены.

Если множества документов локальных информационных систем не пересекаются, то глобальный ответ распределенной системы представляется как объединение локальных ответов

$$\left(\bigvee_{1 \leq k \leq n} D_k \bigcap_{1 \leq l \leq n} D_l = 0 \right) \wedge (\bar{m} = \{m_1, \dots, m_s\}) \Rightarrow \delta(m) = \bigcup_{j=1}^n \delta_j(\bar{m}).$$

Если все локальные информационные системы заданы на одном тезаурусе $S_j = (V_j, D_j, M_j, \delta_j)$, $j = \overline{1, n}$, а множество документов разнесены, то ответ на глобальный вопрос будет объединением локальных ответов, то есть если

$$\bar{m} = \{m_1, \dots, m_k\} - \text{вопрос } \forall_{1 \leq i \leq n} V_i = V, \text{ тогда } \delta(\bar{m}) = \bigcup_{j=1}^n \delta_j(\bar{m}).$$

Введем веса, которые будут описывать распределение информации на каждом слове. Информацию, заложенную в описании документов, будем рассматривать в виде единицы, следовательно, вес w_i соответствует объему информации, падающей на дескриптор v_i , то есть $v(d) = \{ \langle v_1, w_1 \rangle, \langle v_2, w_2 \rangle, \dots, \langle v_k, w_k \rangle \}$ и выполняются условия:

$$v_i \neq v_j \wedge v_i K v_j \Rightarrow (\forall w_i \in [0, 1]) (v_i, w_i) \in v \left(\forall w_j \in (v_j, w_j) \in v(d) \right), \sum_{i=1}^k w_i = 1.$$

Описание документов удовлетворяют свойству включения. Дадим определение понятию подобия вопросов и описаний документов.

Пусть $v(d_1), v(d_2)$ – описания документов:

$$v(d_1) = \{ \langle v_{11}, w_{11} \rangle, \langle v_{12}, w_{12} \rangle, \dots, \langle v_{1k_1}, w_{1k_1} \rangle \};$$

$$v(d_2) = \{ \langle v_{21}, w_{21} \rangle, \langle v_{22}, w_{22} \rangle, \dots, \langle v_{2k_2}, w_{2k_2} \rangle \}.$$

Описание $v(d_1)$ подобно описанию $v(d_2)$ с точностью ρ ($0 \leq \rho \leq 1$), если $v(d_1) \leq v(d_2) \wedge w_{1i}, \rho \leq \sum w_{2j}, \langle v_{11}, w_{11} \rangle \in v(d_1) j : [v_{2j} \in J(v_{1j})]$, где $J(v_{1j}) = \{v_{2j} : v_{1j} K v_{2j} \wedge (1 \leq j \leq K_2) \text{ при } 1 \leq i \leq K_1\}$.

Если $v(d_1)$ и $v(d_2)$ удовлетворяют условию, то пишется $v(d_1) \triangleleft \rho v(d_2)$.

Представляет интерес и другая величина, характеризующая коэффициент подобия или меру корреляции пар векторов, удовлетворяющих отношению $\leq$.

Для векторов

$$\mu(v(d_1), v(d_2)) = \sum_{i(v_{1i}, w_{1i}) \subset v(d_1)} \min(w_{1i}, \sum w_{2j}), \quad j : [v_{2j} \in J(v_{1i})],$$

где $J(v_{1i}) = \{v_{2s} : v_{1i} K v_{2s} \wedge 1 \leq s \leq k_2\}$ при $1 \leq i \leq k_1$. Мера μ , по сути дела, оценивает информацию, заключенную в описании документов $v(d_1), v(d_2)$.

Информационной системой на тезаурусе с весами называется четверка (V, D, M, δ) , где V – тезаурус с дескрипторным множеством $V_0 \subset V$; D – корреляция документов; M – множество вопросов; δ – отображение $\delta : M \times [0, 1] \rightarrow \rightarrow 2D \times [0, 1]$, сопоставляющее каждой паре (вопрос, точность подобия) множество пар (документ мера корреляции).

Ответом системы на вопрос $\bar{m}$ с требуемой точностью $\rho = c$ называется множество

$$Q = \delta(\bar{m}, c) = \{(d, \alpha) : d \in D \wedge \bar{m} c v(d) \wedge \alpha = \mu(\bar{m}, v(d))\} \subseteq D \times [0, 1].$$

В определении ответа $N = \delta(\bar{m}, c)$ отношение подобия осуществляет выбор документов, точность подобия которых не менее c . Мера корреляции $\mu(\bar{m}, v(d))$ показывает, какая часть информации в документе соответствует ответу на вопрос.

Одно из фундаментальных свойств ответа связано с точностью ρ и мерой корреляции μ вопроса к описанию документа, включенного в ответ.

Если документ $d \in D$ с мерой корреляции α включен в ответ, то есть $(d, \alpha) \in \delta(\bar{m}, c)$, то верно неравенство $\alpha \geq c$. Обратное утверждение неверно.

Если $\rho_1 \geq \rho_2$, то $\delta(\bar{m}, \rho_1) \subset \delta(\bar{m}, \rho_2)$.

В многоуровневых системах распознавания важной функцией аналитика данных является оценка качества распознавания на текущем этапе и возникающей из-за этого потери информации на следующем.

При разработке алгоритмов формализации в условиях неопределенности по характеристикам объекта аналитик может использовать модели, критерии и показатели $R_1, \dots, R_i$.

Имеем в виду, что значения показателей получаем на основании алгоритмов оценивания эффективности распознавания. Предположим аддитивность критериев [4, 5]. Учитывая возможные неточности значений показателей из-за вероятностного характера величин, входящих в показатели, наличия значений показателей, представляется целесообразным использование лингвистического подхода. Проранжируем рассматриваемые варианты на основе аддитивной свертки показателей при нечеткой исходной информации [6, 7].

Нечеткие оценки вариантов и коэффициенты важности показателей зададим функциями принадлежности в треугольной форме. Причем коэффициенты важности определяются исходя из предпочтений исследователя на основе аппарата теории одномерной полезности (лингвистического подхода) [8].

Определим методику получения коэффициентов важности показателей оценивания эффективности. Задано множество показателей важности $R = \{R_1, \dots, R_i\}$. Каждый из показателей может принимать конкретные значения $x_1, x_2, \dots, x_m$, которые наступают с нечеткими (лингвистическим) вероятностями $p_1, p_2, \dots, p_n$.

Предпочитаемая величина значений показателей (в дальнейшем полезность) определяется в ходе диалога с исследователем и задается в виде нечеткой функции принадлежности $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$. Определим нечеткую ожидаемую важность (полезность) каждого из показателей. Смысл диалога с исследователем по определению предпочитаемых значений показателей оценивания заключается в следующем. В ходе такого диалога исследуется поведение в условиях риска. Для этого исследователь:

- в соответствии со своими предпочтениями упорядочивает значения показателей: $x_1 \prec x_2 \prec \dots \prec x_n$, где x_1 и x_n – соответственно наименее и наиболее предпочтительные значения;

- обозначая предпочитаемую величину показателя (полезность) w_1 для наихудшего значения, w_n для наилучшего, для каждого значения показателя x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) назначают вероятность p_j такую, что ему будут безразличны следующие ситуации:

- получить значение x_j ;
- получить значение x_n с вероятностью p_j ;
- получить значение x_1 с вероятностью $1 - p_j$.

Получаем тройку $(x_n; p_j; x_1)$, то есть лотерею, полезность (важность) которой находится с помощью выражения $w_j = w_n p_j + w_1 (1 - p_j)$. Для вычисления нечеткой ожидаемой важности каждого показателя будем использовать α -сечение нечеткого множества R (множество уровня α) [4]: $R_\alpha = \{x \in X; \mu_k(x) \geq \alpha\}$, где X – базовое множество, $\alpha \in [0; 1]$, $\mu_k(x)$ – функция принадлежности, α – сечение нечеткой вероятности и нечеткой важности значения показателя оценивания x_j .

Представим в форме треугольных функций принадлежности $\mu(p_j)$ и $\mu(w_j)$ (рис. 1, 2). Если функции принадлежности нечеткой вероятности и нечеткой важности выпуклые и непрерывные, то α -сечение есть замкнутый интервал. Функцию принадлежности каждого показателя будем строить для тех же α , и α -сечения важности каждого показателя есть замкнутый интервал с границами [9, 10]:

$$\inf \omega = \sum_{j=1}^{k-1} M_j w_j + \left(1 - \sum_{j=1}^{k-1} M_j - \sum_{j=k+1}^n m_j \right) w_k + \sum_{j=k+1}^n m_j w_j$$

при $k = k^-$ и $w_j = a_j$;

$$\sup \omega = \sum_{j=1}^{k+1} m_j w_j + \left(1 - \sum_{j=1}^{k+1} m_j - \sum_{j=k+1}^n M_j \right) w_k + \sum_{j=k+1}^n M_j w_j$$

при $k = k^+$ и $w_j = b_j$.

Индексы k^- и k^+ находим из условий:

$$\left\{ 1 - \sum_{j=1}^{k^- - 1} M_j - \sum_{j=k^- + 1}^n m_j \right\} \in [m_{k^-}; M_{k^-}];$$

$$\left\{ 1 - \sum_{j=1}^{k^+ + 1} m_j + \sum_{j=k^+ + 1}^n M_j \right\} \in [m_{k^+}; M_{k^+}].$$

Формулы имеют место для данного показателя i и данного уровня α , поэтому индексы i и α в них отсутствуют (для удобства их восприятия). Так как значения показателей $x_1, x_2, \dots, x_n$, а также их важности (полезности) необходимо предварительно упорядочить, то необходимо упорядочить и границы $a_j; b_j$: $a_1 \prec a_2 \prec \dots \prec a_n$; $b_1 \prec b_2 \prec \dots \prec b_n$.

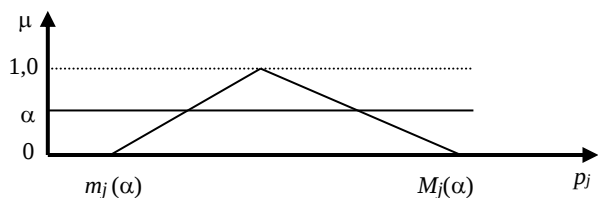


Рис. 1. Функция принадлежности

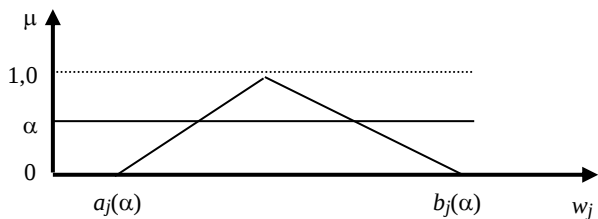


Рис. 2. α -сечение функции принадлежности

Полученные функции принадлежности нечеткой ожидаемой важности показателей изображены графически на рис. 3. По треугольным функциям определяем значения коэффициентов важности показателей

$$p_{j\alpha}=[m_j(\alpha);M_j(\alpha)], \quad w_{j\alpha}=[a_j(\alpha);b_j(\alpha)]; \quad \forall \alpha[0;1].$$

Так как функции принадлежности нечетких вероятностей и нечетких важностей значений показателей алгоритмов формализации в условиях неопределенности элементов моделей объектов распознавания известны, то задаваясь различными значениями α , получаем тот материал, обработав который и найдем функции принадлежности важности показателей алгоритмов формализации в условиях неопределенности элементов моделей (рис. 4).

Проведем аддитивную свертку показателей. Варианты $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, оцениваемые по $n = i$ показателям, имеющим коэффициенты важности $W_1, W_2, \dots, W_n$, необходимо упорядочить. Через R_{ij} обозначим оценку i -го варианта (S_i) по j -у показателю ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) и через R_i – оценку i -го варианта по всем показателям (взвешенную оценку). Оценки R_{ij} по показателям и коэффициенты относительной важности показателей W_{ij} задаем функциями принадлежности, соответственно $\mu_{R_{ij}}(r_{ij})$ и $\mu_{W_j}(\omega_j)$. Взвешенная оценка i -го варианта вычисляется по формуле $R_i = \sum_{j=1}^n W_j R_{ij}$ при условии, что оценки – нормированы. Будем

пользоваться треугольным представлением нечетных оценок и коэффициентов относительной важности показателей. Если функции принадлежности двух нечетких множеств X и Y имеют треугольное представление (см. рис. 1 – 4), то нечетное множество $Z = X * Y$ также определяется функцией принадлежности треугольного вида, а границы и вершина находятся следующим образом: $z' = x' * y'$, $z'' = x'' * y''$, $z = x * y$, где x', y', x'', y'', x, y – соответственно левая, правая границы и вершины функций принадлежности нечетких множеств X и Y , $*$ – бинарная операция над функциями принадлежности нечетких множеств X и Y [11].

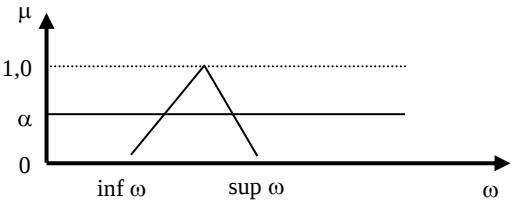


Рис. 3. Правые и левые границы функции принадлежности

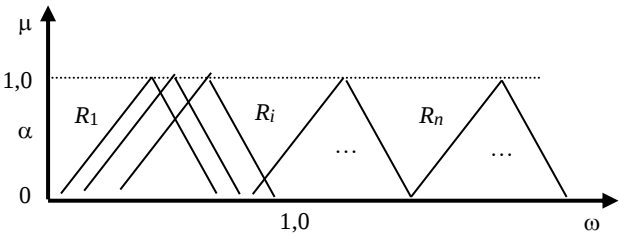


Рис. 4. Выбор наилучшего варианта. Бинарное сравнение

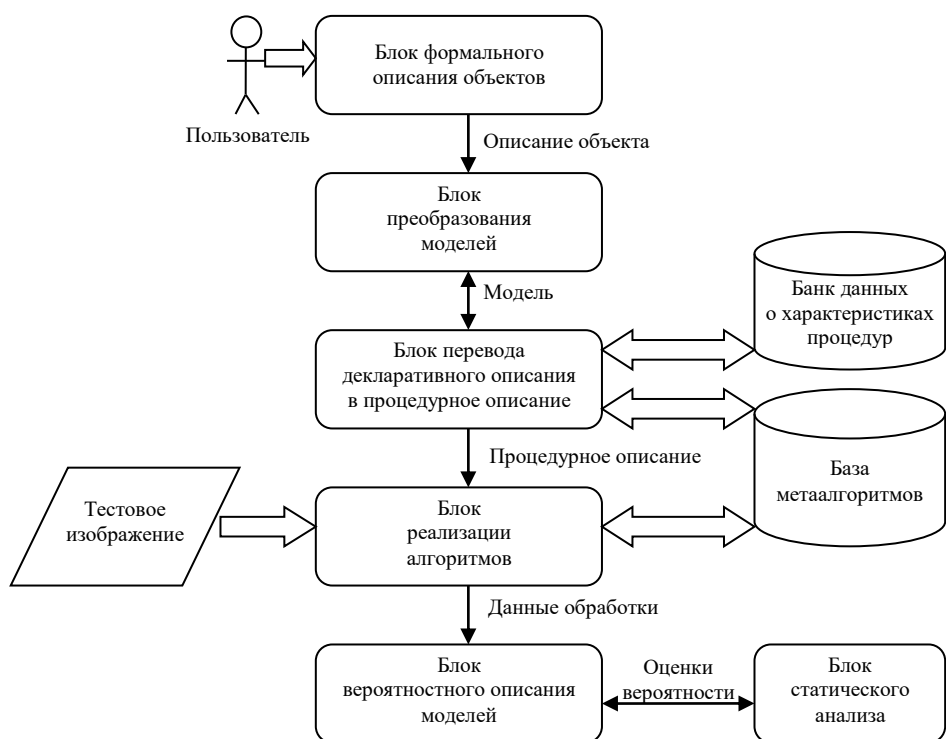


Рис. 5. Структура системы выбора алгоритмов распознавания изображений

После того как взвешенные оценки получены, необходимо сравнить варианты на их основе. Для этого вводится нечеткое множество I , заданное на множестве индексов вариантов $\{1, 2, \dots, n\}$, и значение соответствующей функции принадлежности интерпретируется как характеристика того, насколько вариант x_i является лучшим. Значение $\mu(i)$ вычисляется по формуле $\mu_I(i) = \sup \min \mu_{j=Ri/1,n}(r_i)$ [12, 13].

Графически значение $\mu(i)$ равно ординате точки пересечения взвешенной оценки i -го варианта и взвешенной оценки наилучшего варианта (то есть того варианта, вершина функции принадлежности которого расположена справа от всех остальных). В простейшем случае для обнаружения контурных и полутоновых объектов на цветных и полутоновых изображениях система может иметь вид, показанный на рис. 5.

Заключение

Таким образом, при проектировании и системном анализе процесса функционирования универсальных многопрофильных междисциплинарных центров распознавания образов, функционирующих как в экспресс-режиме, так и в режиме углубленного анализа, возможно рассматривать поиск вектора признаков как модель распределенной информационной системы на тезаурусе, методы лингвистической лотереи для свертки показателей при нечеткой исходной информации.

Список литературы

1. Алтуни, А. Е. Применение теории нечеткости для оценивания технологических параметров в АСУ ВПО «Тюменгазпром» / А. Е. Алтуни, С. Н. Чуклеев, М. В. Семухин // Труды ЗапсибНИГНИ : Проблемы нефти и газа Тюмени. – Тюмень, 1983. – Вып. 58. – С. 57 – 59.

2. An access Control System Based on Multimodal Approach / V. V. Alekseev, D. V. Lakomov, G. Al Maamari, M. V. Moiseeva // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2467, No. 1. – P. 050001. doi: 10.1063/5.0093508
3. Алексеев, В. В. Анализ применимости алгоритма Кэнни для распознавания изображений в условиях неопределенности / В. В. Алексеев, П. И. Карасев, Д. В. Лакомов // Информатика: проблемы, методология, технологии : материалы XVI Междунар. науч.-метод. конф. (Воронеж, 11–12 февраля 2016 г.). – Воронеж, 2016. – С. 42 – 45.
4. Вагин, В. В. Интеллектуальный модуль определения изображений деструктивной направленности / В. В. Вагин, В. В. Алексеев, Е. Н. Емельянов ; под ред. А. А. Зацаринного, Д. Н. Борисова // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XX Междунар. науч.-метод. конф. (Воронеж, 13–14 февраля 2020 г.). – Воронеж, 2020. – С. 363 – 367.
5. Анализ и синтез структур информационных целенаправленных систем : монография / Ю. Ю. Громов, М. А. Ивановский, О. Г. Иванова, А. В. Яковлев ; под ред. Ю. Ю. Громова. – Саарбрюкен (Германия) : LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2015. – 164 с.
6. Моделирование информационных систем на основе использования дискретных и непрерывных законов распределения и их аппроксимации / Ю. Ю. Громов, Ю. В. Минин, О. Г. Иванова, А. П. Рыжков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 3. – С. 26 – 33.
7. Животников, Г. С. Теоретико-возможностные модели распознавания / Г. С. Животников, Ю. П. Пытьев // Математические методы распознавания образов : докл. 10-й Всерос. конф. – М., 2001. – С. 56–57.
8. Кобелев, К. С. Интеллектуальная система распознавания объектов на изображениях / К. С. Кобелев, Ю. В. Минин, С. В. Ковалев // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве : тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Воронеж, 09–10 ноября 2017 г.). – Воронеж, 2017. – Т. 1. – С. 295 – 299.
9. Лакомов, Д. В. Логико-лингвистическая модель определения контурных точек сосредоточенных и площадных объектов в условиях неопределенности / Д. В. Лакомов, Д. В. Поляков, В. В. Алексеев ; под ред. А. А. Зацаринного, Д. Н. Борисова // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XX Междунар. науч.-метод. конференции (Воронеж, 13–14 февраля 2020 г.). – Воронеж, 2020. – С. 1484 – 1491.
10. Модель анализа изображений на основе метода нечёткой кластеризации / Д. В. Лакомов, В. В. Алексеев, Ю. В. Минин, Ю. В. Кулаков, Г. Н. Нурутдинов // Информация и безопасность. – 2017. – Т. 20, № 4(4). – С. 580 – 583.
11. Лакомов, Д. В. Модель анализа изображений на основе модернизированного алгоритма контурного анализа / Д. В. Лакомов, В. В. Алексеев // Нейрокомпьютеры и их применение : тезисы докл. XVII Всерос. науч. конф. (Москва, 19 марта 2019 г.). – М., 2019. – С. 259 – 261.
12. К вопросу об идентификации информационного процесса в системе поддержки принятия решений / Д. Х. Льюнг, А. С. Моисеев, Ю. В. Минин, В. В. Алексеев // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19(19). – С. 28 – 31.
13. Перфильева, И. Приложения теории нечетких множеств / И. Перфильева // Итоги науки и техники. Серия Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. – 1990. – Т. 29. – С. 83 – 151.

To the Problem of Formalizing the Operation of Complex Pattern Recognition Systems

I. A. Glazkova, M. A. Ivanovsky✉, Badr Khalil Mahmud El Eissawi

Department of Information Systems and Information Security, ivanovskiy_62@mail.ru;
TSTU, Tambov, Russia

Keywords: decomposition of recognition algorithms; information system; linguistic lottery; pattern recognition system; a complex system; thesaurus; formalization of functioning.

Abstract: For single-level pattern recognition systems, it is proposed to consider the search for a feature vector as a model of a distributed information system on a thesaurus. For multi-level complex recognition systems, a decomposition method is proposed, which is associated with the inclusion of a data analyst in the recognition process. When formally describing the recognition system at the stage of image synthesis, possible inaccuracies in the values of indicators are taken into account due to the probabilistic nature of the quantities included in the indicators, a linguistic lottery, and additive convolution of indicators with fuzzy initial information were used.

References

1. Altunin A.E., Chukleev S.N., Semukhin M.V. [Problems of oil and gas of Tyumen], *Trudy ZapsibNIGNI: Problemy nefti i gaza Tyumeni* [Proceedings of ZapsibNIGNI], Tyumen, 1983, issue 58, pp. 57-59. (In Russ.)
2. Alekseev V.V., Lakomov D.V., Al Maamari G., Moiseeva M.V. An access Control System Based on Multimodal Approach, *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2467, no. 1, pp. 050001. doi: 10.1063/5.0093508
3. Alekseev V.V., Karasev P.I., Lakomov D.V. *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-metod. konf* [Informatics: problems, methodology, technologies: Materials of the XVI International Scientific and Methodological Conference], Voronezh, February 11-12, 2016, Voronezh, 2016, pp. 42-45. (In Russ.)
4. Vagin V.V., Alekseev V.V., Emelyanov E.N.; Zatsarinny A.A., Borisov D.N. (Eds.). *Informatika: problemy, metody, tekhnologii: materialy XX Mezhdunar. nauch.-metod. konf.* [Informatics: problems, methods, technologies: materials of the XX International. scientific method. conf.], (Voronezh, February 13–14, 2020), Voronezh, 2020, pp. 363-367 (In Russ.)
5. Gromov Yu.Yu. (Ed.), Ivanovsky M.A., Ivanova O.G., Yakovlev A.V. [Analysis and synthesis of structures of information purposeful systems: monograph], Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 164 p. (In Russ.)
6. Gromov Yu.Yu., Minin Yu.V., Ivanova O.G., Ryzhkov A.P. [Modeling of information systems based on the use of discrete and continuous distribution laws and their approximation], *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2019, no. 3, pp. 26-33. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Zhivotnikov G.S., Pyt'yev Yu.P. *Matematicheskiye metody raspoznavaniya obrazov : dokl. 10-y Vseros. konf.* [Mathematical methods of image recognition: reports. 10th All-Russian conf.], Moscow, 2001, pp. 56-57. (In Russ.)
8. Kobelev K.S., Minin Yu.V., Kovalev S.V. *Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovani, upravlenii, proizvodstve: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [New technologies in scientific research, design, management, production Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], (Voronezh, November 09-10, 2017), Voronezh, 2017, vol. 1, pp. 295-299. (In Russ.)
9. Lakomov D.V., Polyakov D.V., Alekseev V.V.; Zatsarinny A.A., Borisov D.N. (Eds.). *Informatika: problemy, metody, tekhnologii: materialy XX Mezhdunar. nauch.-metod. konf.* [Informatics: problems, methods, technologies. Proceedings of the

XX International Scientific and Methodological Conference], (Voronezh, February 13-14, 2020), Voronezh, 2020, pp. 1484-1491. (In Russ.)

10. Lakomov D.V., Alekseev V.V., Minin Yu.V., Kulakov Yu.V., Nurutdinov G.N. [An image analysis model based on the fuzzy clustering method], *Informatsiya i bezopasnost'* [Information and security], 2017, vol. 20, no. 4 (4), pp. 580-583 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Lakomov D.V., Alekseev V.V. *Neyrokompyutery i ikh primeneniye: teziy dokl. XVII Vseros. nauch. konf.* [Neurocomputers and their application: abstracts of the XVII All-Russian Scientific Conference], (Moscow, March 19, 2019), Moscow, 2019, pp. 259-261 (In Russ.)

12. Luong H.D., Moiseev A.S., Minin Yu.V., Alekseev V.V. [On the issue of identification of the information process in the decision support system], *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii* [Modern information technologies], 2014, no.19(19), pp. 28-31 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Perfil'eva I. [Applications of the theory of fuzzy sets], *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika.* [Results of Science and Technology. Series Theory of Probability. Math statistics. Theoretical cybernetics], 1990, vol. 29, pp. 83-151. (In Russ., abstract in Eng.)

Zur Frage der Formalisierung des Funktionierens komplexer Mustererkennungssysteme

Zusammenfassung: Für einstufige Mustererkennungssysteme ist vorgeschlagen, die Suche nach einem Merkmalsvektor als Modell eines verteilten Informationssystems in einem Thesaurus zu betrachten. Für mehrstufige komplexe Erkennungssysteme ist eine Zerlegungsmethode vorgeschlagen, die mit der Einbeziehung eines Datenanalysten in den Erkennungsprozess verbunden ist. Bei der formalen Beschreibung des Erkennungssystems im Stadium der Bildsynthese sind mögliche Ungenauigkeiten der Indikatorenwerte aufgrund des probabilistischen Charakters der darin enthaltenen Größen berücksichtigt. Bei den Indikatoren sind eine linguistische Lotterie, eine additive Faltung von Indikatoren mit unscharfen Ausgangsinformationen verwendet.

Vers une question de la formalisation du fonctionnement des systèmes complexes de la reconnaissance des images

Résumé: Pour les systèmes de reconnaissance de images à un seul niveau, est proposé de considérer la recherche des vecteurs des caractéristiques comme un modèle de système d'information distribué sur le thésaurus. Pour les systèmes de reconnaissance complexes à plusieurs niveaux, est proposée une méthode de la décomposition qui implique l'inclusion d'un analyste de données spécialisé dans le processus de reconnaissance. Lors de la description formelle du système de reconnaissance au stade de la synthèse des images, sont pris en compte les inexactitudes possibles des valeurs des indicateurs en raison de la nature probabiliste des grandeurs entrant dans les indicateurs; sont utilisées la loterie linguistique et la convolution additive des indicateurs avec des informations brutes floues.

Авторы: *Глазкова Инга Александровна* – магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Ивановский Михаил Андреевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Эль Эисави Бадр Халил Махмуд* – аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ВИДА ПОГРУЖНОГО БАРАБАНА В УСТАНОВКЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ В НАСЫПНОМ ВИДЕ

М. А. Матрохин, В. А. Немтинов✉, С. Я. Егоров

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
nemtinov@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: анод; гальванический барабан; информационно-логическая модель; многофункциональная установка гальванического покрытия деталей насыпью; перфорация; принятие решений; электролит.

Аннотация: Рассмотрен подход к автоматизированному выбору вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью, базирующийся на использовании теории построения экспертных систем. Поставлена и решена задача оптимального выбора вида погружного барабана и формы токопроводящего анода. Рассмотрены вопросы построения информационно-логической модели поддержки принятия решений при их выборе, позволяющей в зависимости от заданных формы и размеров обрабатываемых деталей в насыпном виде найти оптимальный вариант вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке. Для подготовки конструкторской документации многофункциональной установки гальванического покрытия деталей насыпью разработаны цифровые параметрические модели возможных видов барабанов и токопроводящих анодов в системе SolidWorks. Разработан программный комплекс, реализующий решение поставленной задачи, и апробирован при проведении процесса цинкования мелких деталей (шпилек, втулок, гаек).

Введение

Основной проблемой при покрытии мелких деталей в гальваническом барабане является унос (забор) из ванны раствора электролита. Унос электролита влечет за собой как потерю времени при цикличности процесса, так и финансовые затраты. При уносе электролита из процессной ванны он попадает в ванну промывки, что в последствии влечет за собой затраты временные на добавление промывных вод, а также финансовые – на привлечение нейтрализующих веществ для очищения впоследствии промывных стоков. Затраты на приобретение и пополнение электролита являются приоритетными составляющими при проведении процессов покрытия [1 – 3].

Во время использования гальванических барабанов предусмотрены приводы вращения для лучшего перемешивания деталей внутри, а также для опустошения барабана от электролита. В момент подъема барабана и вывешивания над технологической позицией происходит полное удаление излишков влаги.

В работе рассмотрены вопросы автоматизированного выбора вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью, обеспечивающего сведение к минимуму потери времени при цикличности процесса гальванопокрытия, а также финансовые затраты.

Задача оптимального выбора вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью

В формализованном виде постановку задачи оптимального выбора вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью в зависимости от заданных формы и размеров обрабатываемых деталей в насыпном виде, наименований покрытия представим следующим образом: необходимо найти такой вид погружного барабана и форму токопроводящего анода, чтобы при выполнении:

– условия

$$Tx_i^{\min} \leq Tx_i \leq Tx_i^{\max}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad (1)$$

где Tx_i , $Tx_i^{\min}$, $Tx_i^{\max}$ – соответственно текущее и предельные значения i -й характеристики погружного барабана и формы токопроводящего анода; N – количество характеристик;

– оператора, представляющего математическую модель поддержки принятия решения при проведении технологических процессов гальванического покрытия деталей в насыпном виде, включающую в себя информацию о форме и размерах обрабатываемых деталей, наименований покрытий, временах цикличности проведения технологического процесса, затратах на пополнение электролита после очередного его цикла, справедливо следующее положение:

$$k_{\text{opt}} = \arg \min Q(k), \quad k \in K. \quad (2)$$

Критерий оптимальности Q представлен в виде суммы относительных потерь критериев, взятых с определенными значениями их важности: ориентировочных приведенных затрат на реализацию технологических процессов гальванических покрытий, технологичности их проведения, а также среднего времени цикличности процесса в зависимости от вида погружного барабана и формы токопроводящего анода:

$$Q(k) = \sum_{j=1}^3 (\rho_j \varpi_j(k)), \quad (3)$$

где $\rho_j \varpi_j(k)$ – взвешенные потери по каждому j -му критерию; $\rho_j \varpi_j(k) = \varpi_j(F_j(k))$, $j=1,\dots,3$, $k \in K$ – функциональные зависимости, преобразующие соответствующие функции $F_j(k)$ к безразмерному виду; $F_1(k)$ – ориентировочные затраты на реализацию технологических процессов гальванических покрытий деталей в насыпном виде; $F_2(k)$, $F_3(k)$ – соответственно значения технологичности процессов их проведения и времени стекания из гальванического барабана в зависимости от вида барабана и формы токопроводящего анода. Для функций $F_1(k)$ и $F_3(k)$ будем искать минимум, для функции $F_2(k)$ – максимум; ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 – весовые коэффициенты, заданные экспертами,

$$\rho = \left\{ \rho_j : \rho_j \geq 0, \quad j=1,2,3; \quad \sum_{j=1}^3 \rho_j = 1 \right\}, \quad (4)$$

Для определения времени стекания электролита из гальванического барабана при вывешивании его над технологической позицией необходимо учитывать плотность засыпаемых деталей, процент заполнения объема барабана, а также размер перфорации для определения коэффициента перфорированности поверхности барабана.

Функциональные зависимости, преобразующие функции $F_j(k)$ к безразмерному виду, запишем как:

$$\varpi_l(k) = \frac{F_l(k) - F_l^0}{F_l^{\max} - F_l^0}, l = 1, 3; \quad \varpi_2(k) = \frac{F_2^0(k) - F_2(k)}{F_2^0 - F_2^{\min}}, \quad (5)$$

здесь $F_1^{\max}, F_3^{\max}$ – максимальные значения функций $F_1(k)$ и $F_3(k)$, для которых выполняется поиск минимума; $F_2^{\min}$ – минимальное значение функции $F_2(k)$, для которой выполняется поиск максимума; F_1^0, F_2^0, F_3^0 – оптимальные значения соответствующих $F_j(k)$, $j = 1, 2, 3$.

При решении задачи (1) – (5) задаются значения коэффициентов ρ_j , $j = 1, \dots, 3$, удовлетворяющие соотношению (4) и отражающие относительную значимость критериев $F_j(k)$.

Для каждого k -го формируемого множества возможных вариантов решения задачи ориентировочные приведенные затраты $F_1(k)$ представляют собой сумму стоимостей отдельных стадий процесса, а $F_2(k)$ и $F_3(k)$ задаются экспертами соответственно как произведения значений технологичности и времени стекания электролита из гальванического барабана, входящих в k -й вариант формируемого множества решений.

Исходными данными при постановке задачи выбора модели погружного гальванического барабана являются размеры обрабатываемых деталей, их количество. Градация типов форм и размеров обрабатываемых деталей представляет перечень максимально и минимально допустимых габаритных типоразмеров при выборе перфорированной решетки.

На рисунке 1 представлены типы барабанов по форме перфорирующих элементов: барабаны соответственно с прямоугольной и круглой перфорациями всей максимальной площади поверхности барабана (рис. 1, а, б); барабан с вырезами под перфорированные фильеры (рис. 1, в). Производство того или иного типа и конструкции барабана зависит от технологий производства и предпочтений заказчика.

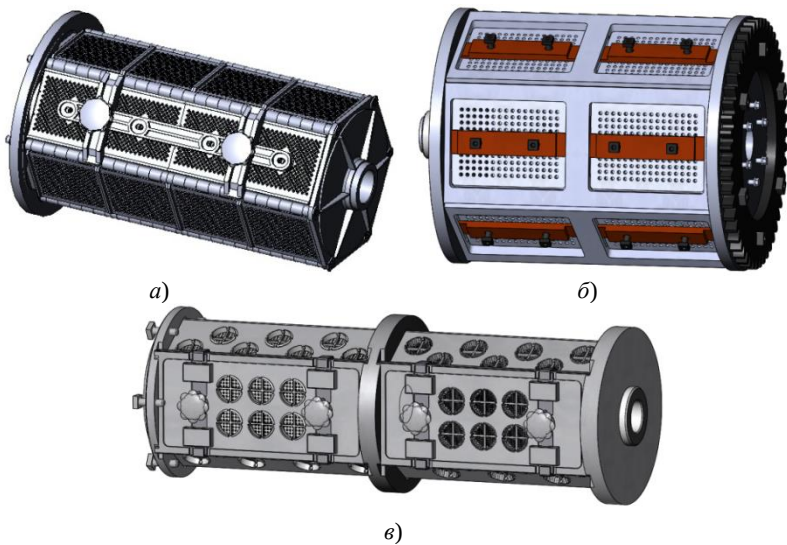


Рис. 1. Погружные гальванические барабаны под прямоугольную и круглую перфорации (а, б) и под цилиндрические фильеры (в)



Рис. 2. Сечение перфорированного отверстия

Зависимость между размерами и формами деталей, покрываемых в гальваническом барабане, и сечением перфорированного отверстия является прямой. Если производить покрытие более мелких деталей с габаритными размерами 3...5 мм и не превышающими 20 мм, форма и вид деталей не важен, тип барабана (см. рис. 1, а, б) приоритетнее, так как слив электролита произойдет быстрее при поднятии барабана. Таким образом, выбирать тип барабана следует с наименьшей застойной зоной и большей общей площадью перфорированных отверстий. Если детали имеют заостренные наконечники, такие как винты,

спицы, болты, шпильки, то сечение перфорации должно выглядеть по типу зауженного конуса или параллелепипеда внутрь барабана (рис. 2). Такой тип перфорации максимально препятствует попаданию деталей в перфорированное отверстие заостренными частями, не мешая при этом равномерной циркуляции электролита в барабане.

Для деталей более крупных размеров 20...100 мм и преимущественно объемной формы, таких как цилиндры, габаритные метизы, бобышки, приемлемым выбором будет тип барабана, показанный на рис. 1, в. Так как деталей таких размеров будет меньше в барабане, электролит равномернее покрывает их поверхности. Производство таких барабанов будет дешевле и технологически проще в плане изготовления.

Как отмечено выше, время стекания электролита из гальванического барабана при вывешивании его над технологической позицией зависит от плотности засыпаемых деталей, процента заполнения объема барабана, а также размера перфорации. В связи со сложностью получения строгой математической зависимости времени от этих параметров использовали качественную оценку. В работе она представлена термами: «быстро», «умеренно быстро», «не очень быстро», «медленно», «умеренно медленно», «очень медленно» и др. Для количественной оценки времени (лингвистической переменной) и сравнения ее с другими вариантами формируемого множества решения задачи (1) – (5) необходимо определить четкие значения ее термов, которые бы позволили осуществить переход от нечетких значений к числовым. Значение времени h , описанное Л-функцией принадлежности, в качестве центра максимума будет принимать величину h_j^* , а при описании

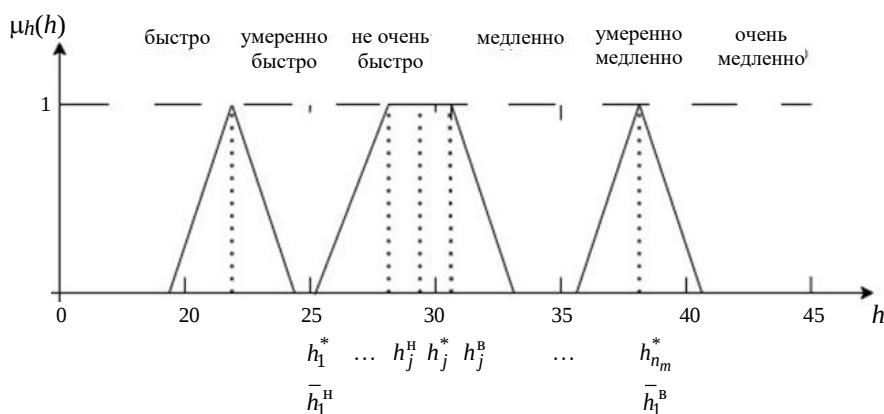


Рис. 3. Дефазификация нечетких данных при оценке времени стекания электролита

П-функцией – $h_j^* = (h_j^B + h_j^H)/2$ (рис. 3). Для нахождения взвешенного значения h использована формула

$$h = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{\rho}_j h_j^*}{\sum_{j=1}^n \bar{\rho}_j}, \quad (6)$$

где $\bar{\rho}_j$ – коэффициент значимости значения времени для j -й группы экспертов.

Пусть

– для Л-функции

$$\bar{\rho}_j = 1; \quad (7)$$

– для П-функции

$$\bar{\rho}_j = \frac{h_j^B - h_j^H}{\bar{h}^B - \bar{h}^H}, \quad (8)$$

где $\bar{h}^H, \bar{h}^B$ – соответственно нижняя и верхняя границы диапазона изменения значения времени h .

Практические исследования показали, что форма токопроводящего анода также влияет на качество покрытия деталей в зависимости от типа анодов. Для более мелких деталей необходимо использовать барабан с погружными анодами (рис. 4, а). Для деталей кольцевой формы приоритетно использовать барабан со сплошным анодом для постоянного соприкосновения внутренней поверхности кольца с токопроводящим анодом (рис. 4, б).

Для поиска оптимального варианта выбора вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью в зависимости от заданных формы и размеров обрабатываемых деталей в насыпном виде разработана информационно-логическая модель поддержки принятия решений, включающая в себя множество продукционных правил [9 – 11].

Информационно-логическая модель поддержки принятия решения

В качестве примера приведем ряд правил, с помощью которых можно сформировать множество возможных вариантов видов погружного барабана и формы токопроводящего анода. Продукционные правила, входящие в состав модели, построены по типу: *если ... (условия выполняются), то ... (реализация следствия)*.

В настоящее время база содержит более 150 правил, отобранных экспертами и авторами в процессе контактов с конструкторами гальванического оборудования, для деталей, обрабатываемых в насыпном виде максимального габаритного размера 30×100 мм.

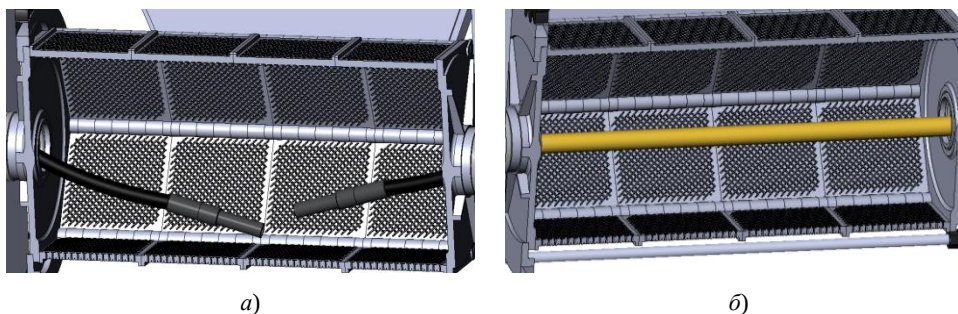


Рис. 4. Барабан с погружными (а) и сплошным (б) анодами

Приведем фрагмент базы правил.

А) Правила выбора типа погружного барабана:

1) *если «размер детали» = «от 1,0 до 50,0 мм», то «тип барабана» = «перфорированная решетка» (см. рис. 1, а, б);*

2) *если «размер детали» = «от 50,0 до 100,0 мм» и «форма детали» = «деталь плоской формы», то «тип барабана» = «перфорированная решетка» или «тип барабана» = «фильера» (см. рис. 1, а – в);*

3) *если «размер детали» от «15,0 до 100,0 мм» и «форма детали» = «цилиндры, габаритные метизы, бобышки», то «тип барабана» = «со съёмными фильерами» (см. рис. 1, в);*

4) *если «форма детали» = «деталь плоской формы», то «тип барабана» = «перфорированная решетка» (см. рис. 1, а, б);*

5) *если «форма детали» = «деталь имеет заостренные наконечники», то «перфорация» = «конусного (параллелепипедного) типа меньшим сечением внутрь барабана» (см. рис. 2).*

Б) Правила выбора размера перфорации погружного барабана:

6) *если «размер детали» = «от 2,0 до 3,5 мм» и «форма детали» = «шарообразная форма», то «форма перфорации» = «прямоугольная», «размер перфорации» = «1,0 × 1,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая», «размер перфорации» = «Ø 1 мм»;*

7) *если «размер детали» = «от 4,0 до 6,0 мм» и «форма детали» = «шарообразная форма», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «3,0 × 3,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 3 мм»;*

8) *если «размер детали» = «от 6,5 до 10,0 мм» и «форма детали» = «шарообразная форма», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «5,0 × 5,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 5 мм»;*

9) *если «размер детали» = «от 11 до 50,0 мм» и «форма детали» = «шарообразная форма», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «7,0 × 7,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 7,0 мм»;*

10) *если «размер детали» = «от 2,0 × 10,0 мм до 5,0 × 20,0 мм», то «размер перфорации» = «1,5 × 15 мм»;*

11) *если «размер детали» = «от 3,5 × 15,0 мм до 5,0 × 20,0 мм», то «размер перфорации» = «3,0 × 12 мм»;*

12) *если «размер детали» = «от 5,5 × 20,0 мм до 15,0 × 50,0 мм», то «размер перфорации» = «5,0 × 15,0 мм»;*

13) *если «размер детали» = «от 15,5 × 50,5 мм до 50,0 × 100,0 мм», то «размер перфорации» = «12,0 × 30,0 мм»;*

14) *если «форма детали» = «шпилька гнутая» и «размер детали» = «от Ø 1 до Ø 5 мм длиной до 25 мм», то «размер перфорации» = «5 мм»;*

15) *если «форма детали» = «шпилька гнутая» и «размер детали» = «от Ø 5,5 мм до Ø 100,0 мм», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «3,0 × 3,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 3,0 мм»;*

16) *если «форма детали» = «пластина» и «размер детали» = «от 0,5 × 10,0 × 10,0 до 5,0 × 50,0 × 50,0 мм», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «от 3,5 × 3,5 мм до 5,0 × 5,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 5,0 мм»;*

17) если «форма детали» = «пластина» и «размер детали» = «от 1,0 × 30 × 50 до 5,0 × 30 × 100 мм», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «от 5,0 × 5,0 до 7,0 × 7,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 5,0 мм»;

18) если «форма детали» = «шток» и «размер детали» = «от Ø 10 до Ø 50 мм длиной до 100 мм», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «7,0 × 7,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 7,0 мм»;

19) если «форма детали» = «кольцо» и «размер детали» = «от Ø 10 до Ø 50 мм», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «7,0 × 7,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 7,0 мм»;

20) если «форма детали» = «шток» и «размер детали» = «от Ø 10 мм до Ø 30 мм длиной более 100 мм», то «форма перфорации» = «прямоугольная» и «размер перфорации» = «5,0 × 20,0 мм» или «форма перфорации» = «круглая» и «размер перфорации» = «Ø 7,0 мм».

В) Правила выбора типа анодов:

21) если «форма детали» = «насыпного вида», то «тип анодов» = «погружной» (см. рис. 4, а);

22) если «форма детали» кольцеобразного вида», то «тип анода» = «сплошной» (см. рис. 4, б).

Для большинства гальванических процессов покрытия деталей в насыпном виде, таких как кадмирование, цинкование, серебрение, латунирование, никелирование, для барабана возможно использовать материал полипропилен. В данном исследовании сделано допущение о том, что материал не будет влиять на ценообразование при производстве барабана.

Информация о характеристиках технологических процессов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент базы характеристик технологических процессов

Номер правила	Ориентировочная стоимость приведенных затрат производства гальванического барабана, р.	Технологичность (баллы от 1 до 10)	Время стекания электролита из барабана, с
...	...	...	
8	8 000	10	39,7
9	7 800	7	33,4
10	7 750	7	27,2
11	7 700	8	28,3
12	7 600	7	25,5
13	8 200	8	22,7
14	7 200	9	28,3
15	8 000	10	32,4
16	10 000	8	40,1
...	...	...	

В результате реализации модели поддержки принятия решений по выбору вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью осуществляется формирование множества возможных вариантов, обладающих разной эффективностью [12]. В настоящее время размерность множества сформированных вариантов не превышает 500, поэтому поиск оптимального варианта осуществляется методом полного их перебора.

**Геометрические параметрические модели погружного барабана
и токопроводящего анода в установке гальванического покрытия
деталей насыпью**

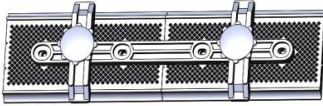
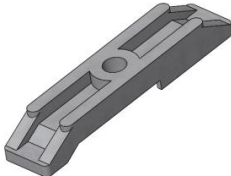
Для подготовки конструкторской документации многофункциональной установки гальванического покрытия деталей насыпью разработаны цифровые модели возможных видов барабанов и токопроводящих анодов в системе Solid-Works. В качестве примера в табл. 2 приведен фрагмент базы моделей основных элементов барабанов и токопроводящих анодов.

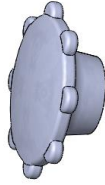
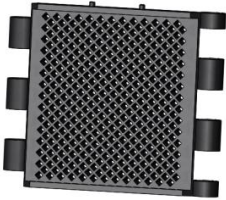
Разработан программный комплекс, реализующий решение задачи (1) – (5), и апробирован в АО «ТАГАТ» им. С. И. Лившица (Тамбов) при конструировании установки для проведения процесса цинкования трех форм деталей: шпильки, втулки и гайки (рис. 5).

Для шпильки с размерами: Ø 1,5 мм, длина 25 мм в гнутом состоянии выбран барабан с прямоугольной перфорацией, диаметром перфорации 1,5 мм и погружными анодами. Для втулок с размерами: Ø 25 мм, длиной 75 мм, – барабан с прямоугольной перфорацией, диаметром перфорации 3,5 мм и погружными анодами. Для цинкового покрытия гаск – барабан с прямоугольной перфорацией, диаметром перфорации 3,0 мм и погружными анодами.

Таблица 2

Фрагмент базы моделей элементов барабанов и токопроводящих анодов

Наименование оборудования	Назначение	Геометрическая 3D-модель	Примечание
1	2	3	4
Барабан	Для загрузки мелких деталей насыпью с дальнейшим покрытием		Перфорация барабана должна соответствовать размерам деталей
Створка барабана	Для открытия и закрытия погрузочного пространства барабана		Перфорация створки должна соответствовать перфорации всего барабана
Замок	Для фиксации створки к основному барабану		Входит в состав створки барабана. Возможны другие вариации конструкции

1	2	3	4
Ручка	Для фиксации замка створки барабана		Входит в состав створки барабана
Панель перфорированная	Для протекания и слива электролита		Является основной составляющей корпуса барабана
Анод	Для передачи технологического тока во время гальванического процесса		В основном представляет собой медную жилу
Фильтра	Для протекания и слива электролита		Устанавливается в барабанах в подготовленные отверстия в стенках барабана



а)



б)



в)

Рис. 5. Оцинкованные детали:
а – шпильки; б – втулки; в – гайки

Заключение

В результате проведенных исследований разработан подход к автоматизированному выбору вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке гальванического покрытия деталей насыпью, базирующийся на использовании теории построения экспертных систем. Поставлена и решена задача оптимального выбора вида погружного барабана и формы токопроводящего анода. Разработана информационно-логическая модель поддержки принятия решений при их выборе, позволяющая в зависимости от заданных формы и размеров обра-

батываемых деталей в насыпном виде найти оптимальный вариант вида погружного барабана и формы токопроводящего анода в установке. Для подготовки конструкторской документации многофункциональной установки гальванического покрытия деталей насыпью разработаны цифровые модели возможных видов барабанов и токопроводящих анодов в системе SolidWorks. Апробация разработанного программного комплекса, реализующего решение задачи (1) – (5) при проведении процессов: цинкования, кадмирования, никелирования, латунирования, серебрения мелких деталей, показала высокую эффективность предложенного подхода. Правильность выбора вида гальванического барабана обеспечит непрерывную работу производства, связанного с покрытием мелких деталей в насыпном виде. Грамотный выбор перфорации обеспечит наиболее лучший поток циркулирующего электролита для обеспечения более равномерного покрытия изделий в насыпном виде.

Список литературы

1. Соловьев, Д. С. Многоанодная электрохимическая ванна как перспективное оборудование для снижения неравномерности наносимого гальванопокрытия / Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Покрытия и обработка поверхности. Последние достижения в технологиях, экологии и оборудования : 9-я Международная конференция (Москва, 28 февраля – 01 марта 2012 г.). – М., 2012. – С. 113 – 115.
2. Васильева, Н. Г. К вопросу автоматизации технологического процесса нанесения гальванопокрытий на примере анодного оксидирования / Н. Г. Васильева, Л. Н. Грачева // Технические науки: традиции и инновации : материалы Междунар. заоч. науч. конф. (Челябинск, 20 – 23 января 2012 г.). – Челябинск, 2012. – С. 58 – 62.
3. Nemtinov, V. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Yu. Nemtinova // MATEC Web of Conferences : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) (Sevastopol, 11 – 15 September, 2017). – 2017. – Vol. 129. – P. 01012. doi: 10.1051/mateconf/201712901012
4. Nemtinov, V. Analysis of Design Solutions for Galvanizing of Small Parts of Ferrous Metals in Bulk / V. Nemtinov, M. Matrochin, Y. Nemtinova, A. Krylov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971, No. 2. – P. 022013. doi: 10.1088/1757-899X/971/2/022013
5. Рыбина, Г. В. Применение интеллектуального анализа данных для построения баз знаний интегрированных экспертных систем / Г. В. Рыбина // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 11. – С. 36 – 53.
6. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373
7. Мокрозуб, В. Г. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 252 – 264. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264
8. Analysis of Decision-Making Options in Complex Technical System Design / V. A. Nemtinov, A. N. Zazulya, V. P. Kapustin, Yu. V. Nemtinov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278(1). – P. 012018. doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012018
9. Mokrozub, V. G. An Approach to Smart Information Support of Decision-

Making in the Design of Chemical Equipment / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 51, No. 7. – P. 487 – 492. doi: 10.1007/s10556-015-0074-4

10. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326 – 331. doi: 10.1007/s10556-017-0342-6

11. Мокрозуб, В. Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 3. – С. 68 – 73.

12. Немтинов, В. А. Разработка электронной модели гальванической системы / В. А. Немтинов, А. А. Родина, Ю. В. Немтинова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 567 – 579. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.567-579.

Information Support for Decision Making by Choosing the Type of Submerged Drum in the Installation for Galvanic Coating of Parts in Bulk Form

M. A. Matrokhin, V. A. Nemtinov✉, S. Ya. Egorov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
nemtinov@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: anode; galvanic drum; information-logical model; multifunctional installation for galvanic coating of parts in bulk; perforation; making decisions; electrolyte.

Abstract: An approach to automated selection of the type of submersible drum and the shape of a conductive anode in an installation for galvanic coating of parts in bulk, based on the use of the theory of constructing expert systems, is considered. The problem of optimal selection of the type of submersible drum and the shape of the conductive anode is posed and solved. The issues of constructing an information and logical model for supporting decision-making in their selection are considered, which allows, depending on the given shape and size of the processed parts in bulk form, to find the optimal option for the type of submersible drum and the shape of the conductive anode in the installation. To prepare design documentation for a multifunctional installation for galvanic coating of parts in bulk, digital parametric models of possible types of drums and conductive anodes were developed in the SolidWorks system. A software package that implements the solution to the problem has been developed and tested during the galvanizing process of small parts (studs, bushings, nuts).

References

1. Solov'yov D.S., Litovka Yu.V. *Pokrytiya i obrabotka poverkhnosti. Posledniye dostizheniya v tekhnologiyakh, ekologii i oborudovaniya: 9-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Coatings and surface treatment. Latest advances in technology, ecology and equipment: 9th International Conference], Moscow, 28 February - 01 March 2012), Moscow, 2012, pp. 113-115. (In Russ.)

2. Vasil'yeva N.G., Gracheva L.N. *Tekhnicheskiye nauki: traditsii i innovatsii: materialy Mezhdunar. zaoch. nauch. konf.* [Technical sciences: traditions and innovations: materials of the International. in absentia scientific conf.], Chelyabinsk, January 20 - 23, 2012, Chelyabinsk, 2012, pp. 58-62. (In Russ.)

3. Nemtinov V., Bolshakov N., Nemtinova Yu. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design, *MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017)*, 11-15 September, 2017, Sevastopol, 2017, vol. 129, pp. 01012. doi: 10.1051/mateconf/201712901012

4. Nemtinov V., Matrochin M., Nemtinova Y., Krylov A. Analysis of design solutions for galvanizing of small parts of ferrous metals in bulk, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 971, no. 2, pp. 022013. doi: 10.1088/1757-899X/971/2/022013

5. Rybina G.V. [Application of intelligent data analysis for the construction of knowledge bases of integrated expert systems], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2012, no. 11, pp. 36-53. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Mokrozub V.G., Malygin E.N., Karpushkin S.V. [System analysis of decision-making processes in the development of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 364-373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Mokrozub V.G., Malygin E.N., Karpushkin S.V. [Statement of the problem of developing mathematical and information support for the design process of multi-product chemical production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 252-264. doi: 10.17277/vestnik. 2017.02.pp.252-264 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Nemtinov V.A., Zazulya A.N., Kapustin V.P., Nemtinov Yu.V. Analysis of Decision-Making Options in Complex Technical System Design, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278(1), pp. 012018. doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012018

9. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A. An Approach to Smart Information Support of Decision-Making in the Design of Chemical Equipment, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, vol. 51, no. 7, pp. 487-492. doi: 10.1007/s10556-015-0074-4

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

11. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Egorov S.Ya. [Information and logical models of technical objects and their representation in information systems], *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2010, no. 3, pp. 68-73. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Nemtinov V.A., Rodina A.A., Nemtinova Yu.V. [Development of an electronic model of a galvanic system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 567-579. DOI 10.17277/vestnik.2019.04.pp.567-579. (In Russ., abstract in Eng.)

Informationsunterstützung für die Entscheidungsfindung nach Wahl des Tauchtrommeltyps in der Anlage für galvanische Beschichtung der Details in Form von Schüttgut

Zusammenfassung: Es ist ein Ansatz zur automatisierten Auswahl des Typs der Tauchtrommel und der Form der leitfähigen Anode in einer Schüttgutbeschichtungsanlage betrachtet, der auf der Verwendung der Theorie des

Aufbaus von Expertensystemen basiert. Das Problem der optimalen Auswahl des Tauchtrommeltyps und der Form der leitfähigen Anode ist gestellt und gelöst. Berücksichtigt sind die Fragen der Erstellung eines Informations- und Logikmodells zur Entscheidungsunterstützung bei deren Auswahl, das es ermöglicht, je nach gegebener Form und Größe der verarbeiteten Teile in Massenform die optimale Option für den Typ der Tauchtrommel und die Form der leitfähigen Anode in der Anlage zu finden. Um die Konstruktionsdokumentation für die multifunktionale Anlage zur galvanischen Beschichtung von Massenteilen zu erstellen, sind im SolidWorks-System digitale parametrische Modelle möglicher Trommeltypen und leitfähiger Anoden entwickelt. Es ist ein Softwarepaket entwickelt, das die Lösung des Problems umsetzt, und das während des Verzinkungsprozesses von Kleinteilen (Bolzen, Buchsen, Muttern) getestet worden ist.

Assistance informatique à la prise de la décision sur la sélection du type de tambour submersible dans l'installation de galvanisation de pièces en vrac

Résumé: Est examinée une approche de la sélection automatisée du type de tambour de charge et de la forme de l'anode conductrice dans une installation de galvanisation des pièces en vrac, basée sur l'utilisation de la théorie de la structure des systèmes experts. Est posé et résolu le problème du choix optimal du tambour d'immersion et de la forme de l'anode conductrice. Sont examinées les questions de la construction d'un modèle d'information et logique d'aide à la décision lors de leur sélection, ce qui permet, en fonction de la forme et de la taille spécifiées des pièces usinées en vrac, de trouver la variante optimale du type de tambour submersible et de la forme de l'anode conductrice dans l'installation. Pour la préparation de la documentation de conception de l'installation multifonctionnelle de galvanoplastie des pièces en vrac, sont élaborés des modèles comparatifs numériques des types possibles de tambours et d'anodes conductrices dans le système SolidWorks. Est mis au point un ensemble de programmes pour réaliser la tâche qui est testé dans le processus de galvanisation de petites pièces (goujons, douilles, écrous).

Авторы: *Матрохин Михаил Александрович* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРИЗНАКОВ КОНТАМИНАЦИИ АГРОКУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ КЛОНАЛЬНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ЦВЕТОМЕТРИИ

Н. И. Лебедь^{1✉}, К. Е. Токарев², Д. С. Гапич¹

*Кафедры: «Электроснабжение и энергетические системы»,
nik8872@yandex.ru (1); «Математическое моделирование и информатика» (2),
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»,
Волгоград, Россия*

Ключевые слова: автоматизация; биотехнологии; искусственный микроклимат; микроклональное размножение; микроконтроллеры; растениеводство; цифровая цветометрия.

Аннотация: Предложен автоматизированный модуль контроля признаков контаминации растений при клональном микроразмножении посредством средств цифровой цветометрии. Рассмотрены критерии качества работы предлагаемого модуля, в частности подобраны факторы, оказывающие влияние на эффективность работы системы. Аналитически обоснованы условия определения итоговых значений составляющих аддитивной цветовой RGB-модели и конечных фактических цветов. Разработана таблица истинности срабатывания оповещения об идентификации контаминации модулем контроля признаков контаминации, а также логическая функция в совершенной дизъюнктивной нормальной форме. Построен алгоритм автоматизированного контроля контаминации в питательной среде / растительном объекте (отклонений от регламентированных показателей по цветовым характеристикам).

Введение

Основное направление получения оздоровленного посадочного материала – микроклональное размножение, преимущество которого заключается в возможности получения высококачественного семенного и посадочного материала культурных растений в условиях лаборатории круглый год в гораздо больших объемах. Соблюдение условий стерильности в процессе микроклонального размножения культур является важнейшим фактором его успешного проведения. Растения обладают высокой восприимчивостью к микроорганизмам, подавляющим их рост, и не способны сопротивляться инфекциям. А поскольку питательная среда, на которой выращиваются экспланты, является идеальной для роста микроорганизмов, необходимо не только исключить возможность контаминации из внешней среды, но и обеспечить эффективную стерилизацию растительного материала, так как на его поверхности и внутри тканей почти всегда присутствует посторонняя микрофлора.

В настоящее время проблема стерильности сред и растительных эксплантов в биотехнологических лабораториях стоит достаточно остро. Причин попадания

бактериальной и микотической инфекций много, но наиболее распространенные две: *первая* – это микроорганизмы, попадающие вместе с растением, которое вводят впервые в культуру; *вторая* – микроорганизмы, которые попадают при какой-либо работе с культурой ткани (чаще всего при пересеве культуры) [1].

Однако даже тщательное соблюдение протоколов способов стерилизации полностью не обеспечивает стерильность питательной среды и эксплантов *in vitro*. В результате возможно появление бактериальной или микотической инфекции, в короткие сроки готовое поразит весь материал растительных клеток или тканей, что приведет к отбраковке ряда образцов и снижению выхода готовой продукции растениеводства. Кроме этого, в худшем случае не исключено заражение бактериальной или микотической инфекцией всей стерильной камеры или лабораторного помещения, что не позволит реализовывать технологию микроклонального размножения растений до полного решения проблемы контаминации и приведет к производственным потерям.

Своевременное обнаружение контаминации питательной среды и эксплантов позволит не только вовремя исключить зараженный образец из стерильной камеры, но и провести оперативное вмешательство для пересева содержимого пробирки, тем самым сохранив его.

Как правило, идентификация контаминации питательной среды или экспланта осуществляется визуально подготовленными людьми, отвечающими за культивирование микрорастений и ведущими мониторинг для контроля за состоянием роста и развития продукции растениеводства в регулируемых условиях микроклимата. Тем не менее обеспечение визуальной достоверной идентификации контаминации осложнено проблемой, представленной индивидуальными и субъективными факторами, такими как низкая квалификация или ее отсутствие, недостаточный опыт работы и утомляемость исполнителей. Кроме этого, отсутствие кадров, оптимизация производства, а также политика выполнения Ведомственного проекта «Цифровое сельское хозяйство», Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017 – 2025 годы («Сельскохозяйственная техника и оборудование», «Селекция и семеноводство») обязывает проводить разработку и внедрение автоматизированных цифровых систем для эффективной реализации культивирования растений на основании достоверных данных.

Решение проблемы состоит в разработке и внедрении системы обнаружения контаминации посредством технического зрения, анализа цифровых снимков с использованием библиотек машинного обучения для последующей обработки искусственными нейронными сетями.

Объекты и методы исследования

Разработка простых и дешевых средств определения состава веществ материалов в режиме реального времени – важная тенденция развития современных аналитических методов в сельскохозяйственной биотехнологии. В последнее время наблюдается устойчивый интерес к химическому анализу, основанному на регистрации электромагнитного излучения в видимом диапазоне длин волн с помощью цифровых устройств для получения цветных растровых изображений. В литературе для обозначения данного метода применяют следующие термины: цифровая или компьютерная цветометрия; видеоаналитические подходы; Digital Color Analysis (DCA), Digital Image Colorimetry (DIC), Digital Image Analysis, Computer Vision based Analytical Chemistry (CVAC) [2, 3].

Метод цифровой или компьютерной цветометрии заключается в определении количественных характеристик цвета и установлении их взаимосвязи с содержанием определяемых веществ в анализируемых объектах. Для количествен-

ной оценки цвета созданы различные цветовые системы – RGB, CMY(K), XYZ, Lab, HSB. Система RGB образована тремя основными цветами – красным (R), зеленым (G) и синим (B), которые отвечают монохроматическому излучению с длинами волн 700,0; 546,1 и 435,8 нм соответственно.

Датчик определения цвета TCS230 представляет собой преобразователь интенсивности светового потока в частоту высокого разрешения, снабженный четырьмя группами фотодиодов без светофильтра и со светофильтрами: красным, зеленым, синим [4] (рис. 1).

Рассматриваемый датчик является программируемым конвертером, объединяющим кремниевые фотодиоды и преобразователь тока в частоту в одном монолитном CMOS-кристалле (*Complementary Metal–Oxide–Semiconductor*). Выходной сигнал представляет собой квадраты (прямоугольный сигнал с заполнением 50 %), частота которого прямо пропорциональна интенсивности светового потока (освещенности). Полное разрешение выходной частоты может быть изменено с помощью двух управляющих выводов (выводы S0 и S1, с помощью которых можно установить масштаб частоты выходного сигнала на 12, 120 и 600 кГц). Цифровые входы и выходы осуществляют прямое подключение к микроконтроллерным или логическим цепям. Инверсный вход разрешения работы переключает выходы устройства в состояние высокого входного сопротивления («третье состояние»), что позволяет присоединять на один вход микроконтроллера несколько датчиков.

Преобразователь освещенности в частоту содержит матрицу 8×8 фотодиодов. Шестнадцать фотодиодов снабжены синими светофильтрами. Шестнадцать других – зелеными и еще 16 – красными, оставшиеся 16 фотодиодов не имеют фильтров. Четыре типа фотодиодов (по светофильтрам) транспонированы для снижения влияния неравномерности освещения датчика и засветки. Все 16 фотодиодов одного типа соединены в параллельную цепь, выбор группы осуществляется через два входных вывода выбора цвета (выводы S2 и S3 позволяют выбрать красную, зеленую, синюю или бесцветную группы).

Предлагается использовать принцип цифровой цветометрии при определении признаков бактерицидной, фунгицидной, а также спороцидной зараженности питательных сред и эксплантов растений при их микрклональном размножении. Так, при посадке эксплантов на агаризованную питательную среду Мурасиге – Скауга в индивидуальные стерильные пробирки соблюдается единообразие внешнего вида, в частности цвета, для всей партии приготовленной питательной среды, в зависимости от ее компонентов и их количества. Как правило, при клональном микроразмножении картофеля базовая агаризованная питательная среда имеет равномерный молочно-серый оттенок (рис. 2, а).



Рис. 1. Датчик определения цвета TCS230

а – общий вид; б – процесс регистрации цветовых характеристик объекта

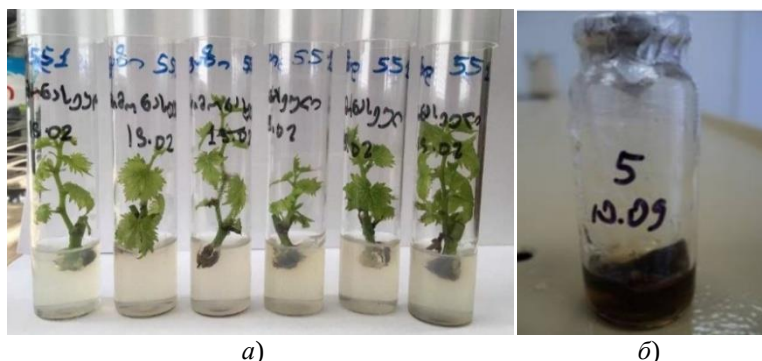


Рис. 2. Посадочный материал растений, полученный путем микроклонального размножения *in vitro* (пример):
 а – стерильный растительный эксплант; б – растительный эксплант, пораженный грибковой инфекцией [1]

Наличие признаков зараженностей четко выражается изменением цветовых характеристик как экспланта, так и самой питательной среды (рис. 2, б), что необходимо обнаружить как можно быстрее для предотвращения потери образца.

Предлагаемая измерительная система автоматизированного модуля контроля признаков контаминации растений при клональном микроразмножении будет выполнена на базе датчика определения цвета TCS230 и микроконтроллера AVR / ARM Cortex-архитектуры или Intel Galileo Gen. 2 на основе Intel Quark SoC X1000, 32-битного Intel Pentium процессора.

Результаты исследований

Для разработки критериев качества работы предлагаемого автоматизированного модуля рассмотрим кибернетическую модель «черного ящика» процесса, предусматривающую анализ факторов, оказывающих влияние на работу системы, а именно одного из критериев, определяющего ее эффективность.

В качестве входных управляемых величин (рис. 3), влияющих на процесс эффективного определения цвета посредством датчика определения цвета TCS230, выделены факторы:

- X_1 – уровень освещения рабочей камеры;
- X_2 – цветовая температура освещения рабочей камеры (холодная, теплая и др.);
- X_3 – форма поверхности контролируемых образцов;
- X_4 – наличие световых пятен (блики) поверхности контролируемых образцов;
- X_5 – время на обнаружения цветовых характеристик;
- X_6 – программные настройки чувствительности и калибровки датчика.



Рис. 3. Модель процесса эффективного определения цвета посредством датчика цвета TCS230

В качестве выходного показателя принят фактор Y , учитывающий эффективность работы системы, а именно достоверность определения конкретного цвета датчиком.

Датчик TCS230 определяет цветовые характеристики объекта по трем каналам R, G, B и программно обеспечивает установку калибровочных значений для каждого из каналов, что необходимо при подготовке автоматизированного устройства контроля признаков контаминации к новым условиям эксплуатации (к примеру, изменение уровня освещенности в рабочей камере с растительными образцами). В результате, конечные итоговые значения составляющих аддитивной цветовой модели находятся следующим образом:

$$R_p + R_{kal} = R_s ; \tag{1}$$

$$G_p + G_{kal} = G_s ; \tag{2}$$

$$B_p + B_{kal} = B_s , \tag{3}$$

где R_s, G_s, B_s – итоговые значения составляющих R, G, B; R_p, G_p, B_p – показания от датчика по составляющим R, G, B; $R_{kal}, G_{kal}, B_{kal}$ – калибровочные значения по составляющим R, G, B (задается из меню системы управления).

Также в алгоритме и реализованном программном коде можно устанавливать значения «чувствительности», то есть порог минимального срабатывания датчика на R-, G-, B-составляющие. В итоге, согласно условиям RGB-модели цифровой цветометрии, с учетом использования датчика определения цвета TCS230 для предлагаемого устройства автоматизированного контроля признаков контаминации растений при клональном микроразмножении, получаем следующие условия определения конкретных цветов (табл. 1).

Таблица 1

**Условия определения конкретных цветов
для аддитивной цветовой RGB-модели**

Цвет	Условие обнаружения конкретного цвета – значения составляющих аддитивной цветовой модели RGB		
	R	G	B
Красный	$R_{ch} < R_s$	$G_s < G_{ch}$	$B_s < B_{ch}$
Зеленый	$R_s < R_{ch}$	$G_{ch} < G_s$	
Синий		$G_s < G_{ch}$	$B_{ch} < B_s$
Белый	$R_{ch} < R_s$	$G_{ch} < G_s$	$B_{ch} > B_s$
Желтый			
Розовый		$G_{ch} > G_s$	$B_{ch} < B_s$
Лазурный	$R_{ch} > R_s$	$G_{ch} < G_s$	
Черный		$G_{ch} > G_s$	$B_{ch} > B_s$

Примечание: R_{ch}, G_{ch}, B_{ch} – порог минимального значения, превышение которого принимается как срабатывание обнаружения цвета «красный» / «зеленый» / «синий», составляющей аддитивной цветовой модели RGB (чувствительность – задается из меню системы управления).

Таблица 2

Таблица истинности срабатывания оповещения об идентификации
контаминации модулем контроля признаков контаминации растений
при клональном микроразмножении

Номер состояния	Контролируемый цвет							
	Красный		Зеленый		Синий		Белый	
	Ф	М	Ф	М	Ф	М	Ф	М
	X_{16}	X_{15}	X_{14}	X_{13}	X_{12}	X_{11}	X_{10}	X_9
	Вес разряда							
	2^{15}	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^9	2^8
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Номер состояния	Контролируемый цвет							
	Желтый		Розовый		Лазурный		Черный	
	Ф	М	Ф	М	Ф	М	Ф	М
	X_8	X_7	X_6	X_5	X_4	X_3	X_2	X_1
	Вес разряда							
	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1

Примечание: Ф – факт наличия контролируемого цвета среди образцов;
М – выбор обнаружения контролируемого цвета в меню программы.

Для срабатывания оповещения обнаружения признаков контаминации образцов необходимо условие, чтобы выявленный по алгоритму цвет совпал с цветом, заданным из меню системы управления. В таблице 2 представлены состояния системы, при котором выходной сигнал равен единице. Логическая функция, описывающая условия, при которых выходной сигнал равен единице представлена в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ) (4):

$$\begin{aligned} Y = & \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \\ & + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \\ & + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \\ & + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 + \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \bar{x}_{14} \bar{x}_{13} \bar{x}_{12} \bar{x}_{11} \bar{x}_{10} \bar{x}_9 \bar{x}_8 \bar{x}_7 \bar{x}_6 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 . \end{aligned} \tag{4}$$

По представленным условиям работы предлагается алгоритм автоматизированного контроля контаминации в питательной среде / растительном объекте (отклонений от регламентированных показателей по цветовым характеристикам) [5, 6] (рис. 4).

Изменение цвета среды по сравнению с регламентированным (может быть вызвано отклонениями pH среды или ростом контаминантов): изменение цвета и появление мути может свидетельствовать о бактериальном или грибковом заражении (контаминации). Если цвет сдвигается в сторону малинового – это может быть связано с отсутствием размножения клеток, недостаточным количеством для данного объема или их гибелью.

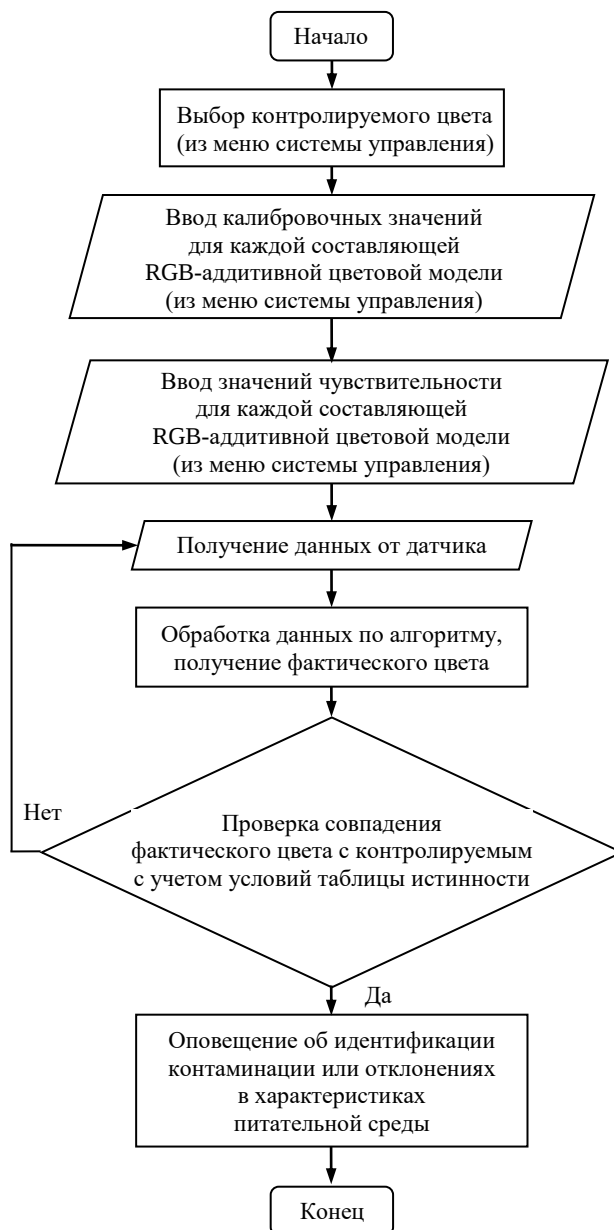


Рис. 4. Алгоритм автоматизированного контроля контаминации в питательной среде / растительном объекте, характеристик питательной среды (отклонений от регламентированных показателей)

Заключение

Разработанный алгоритм автоматизированной интеллектуальной системы контроля контаминации в питательной среде / растительном объекте, характеристик питательной среды (отклонений от регламентированных показателей) обеспечивает идентификацию высокой степени точности биологических загрязнений при микроклональном размножении растений посредством анализа цветковых характеристик объекта, а также цифровых снимков с использованием специализированных библиотек глубокого машинного обучения для последующей обработки искусственными нейронными сетями различных архитектур. Использование данного алгоритма при проектировании систем автоматизации климатических камер для выращивания растений [7, 8] способствует своевременному обнаружению контаминации питательной среды и эксплантов, что позволит не только вовремя исключить зараженные образцы из стерильной камеры, но и провести оперативное вмешательство для пересева содержимого, тем самым предотвращая производственные потери.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20041и администрации Волгоградской области.

Список литературы

1. Зонтиков, Д. Н. Проблемы стерильности сред и растительных эксплантов культуры in vitro лаборатории клонального микроразмножения растений / Д. Н. Зонтиков, Э. В. Марамохин // Молодой ученый. – 2014. – № 8(67). – С. 317 – 320.
2. Моренко, С. А. Устройство для измерения оптических свойств молока // С. А. Моренко, К. С. Моренко // Инновации в сельском хозяйстве. – 2017. – № 2(23). – С. 55 – 60.
3. Ghorude, T. N. Quantitative Color Measurement of PH Indicator Paper Using Trichromatic LEDs and TCS230 Color Sensor / T. N. Ghorude, A. L. Chaudhari, A. D. Shaligram // ICEM 2008: International Conference on Experimental Mechanics. – 2008. – Vol. 7375. doi: 10.1117/12.839311
4. Gotor, R. Low-Cost, Portable Open-Source Gas Monitoring Device Based on Chemosensory Technology / R. Gotor, P. Gaviña, A. M. Costero // Measurement Science and Technology. – 2015. – Vol. 26, No. 8. doi: 10.1088/0957-0233/26/8/085103
5. Свид. о регистрации программы ЭВМ № 2022681596 Российская Федерация. Мониторинг и оценка продуктивности агрофитоценозов при биотехнических способах размножения с использованием средств цифровой цветометрии / Н. И. Лебедь, К. Е. Токарев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГАУ». – № 2022681596 ; заявл. 31.10.2022 ; опубл. 15.11 2022.
6. Полезная модель 208958 Российская Федерация, МПКА01G 9/24, A01G 9/26. Секционная климатическая камера для выращивания растений / Н. И. Лебедь, И. В. Волков, А. М. Макаров, Н. Г. Шаронов, Я. В. Калинин, М. Б. Лебедь ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский технический университет». – № 2021111261 ; заявл. 21.04.2021 ; опубл. 24.01.2022, Бюл. № 3. – 7 с.
7. Мультисекционная климатическая камера для ускоренного производства культурных растений в условиях регулируемых параметров / Н. И. Лебедь, И. В. Волков, М. Б. Лебедь, Я. В. Калинин // Известия ВолгГТУ. – 2021. – № 3(250). – С. 66 – 68. doi: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-66-68
8. Исследование и моделирование режимов работы программно-аппаратного комплекса системы микроклимата на базе программируемого микроконтроллера ATmega 2560 / Н. И. Лебедь, К. Е. Токарев, Д. Д. Нехорошев, М. П. Аксенов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 596 – 605. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.596-605

Simulation of Operation Parameters of an Automated System for Monitoring Signs of Contamination of Agricultural Crops under Conditions of Clonal Reproduction by Digital Color Methods

N. I. Lebed¹✉, K. E. Tokarev², D. S. Gapich¹

Departments: "Power Supply and Energy Systems",
nik8872@yandex.ru (1); "Mathematical Modeling and Informatics" (2),
Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

Keywords: automation; biotechnology; artificial microclimate; microclonal propagation; microcontrollers; crop production; digital colorimetry.

Abstract: An automated module for monitoring signs of plant contamination during clonal micropropagation using digital colorimetry is proposed. The criteria for the quality of operation of the proposed module are considered, in particular, factors that influence the efficiency of the system are selected. The conditions for determining the final values of the components of the additive RGB color model and the final actual colors are analytically substantiated. A truth table for triggering an alert about contamination identification by the module for monitoring signs of contamination has been developed, as well as a logical function in perfect disjunctive normal form. An algorithm has been developed for automated control of contamination in the nutrient medium/plant object (deviations from the regulated indicators for color characteristics).

References

1. Zontikov D.N. [Problems of sterility of media and plant explants of in vitro culture of the laboratory of plant clonal micropropagation], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2014, no. 8 (67), pp. 317-320. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Morenko S.A., Morenko K.S. [Device for measuring the optical properties of milk], *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2017, no. 2 (23), pp. 55-60. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Ghorude T.N., Chaudhari A.L., Shaligram A.D. Quantitative Color Measurement of PH Indicator Paper Using Trichromatic LEDs and TCS230 Color Sensor, *ICEM 2008: International Conference on Experimental Mechanics*, 2008, vol. 7375. doi: 10.1117/12.839311
4. Gotor R., Gaviña P., Costero A.M. Low-Cost, Portable Open-Source Gas Monitoring Device Based on Chemosensory Technology, *Measurement Science and Technology*, 2015, vol. 26, no. 8. doi: 10.1088/0957-0233/26/8/085103
5. Lebed N.I., Tokarev K.E. *Monitoring i otsenka produktivnosti agrofitotsenozov pri biotekhnicheskikh sposobakh razmnozheniya s ispol'zovaniyem sredstv tsifrovoy tsvetometri* [Monitoring and evaluation of the productivity of agrophytocenoses with biotechnical methods of reproduction using digital colorimetry tools], Russian Federation, 2022, Pat. 2022681596. (In Russ.)
6. Lebed N.I., Volkov I.V., Makarov A.M., Sharonov N.G., Kalinin Ya.V., Lebed M.B. *Sektsionnaya klimaticheskaya kamera dlya vyrashchivaniya rasteniy* [Sectional climatic chamber for growing plants], Russian Federation, 2022, Pat. 208958. (In Russ.)
7. Lebed N.I., Volkov I.V., Lebed M.B., Kalinin Ya.V. [Multi-sectional climatic chamber for accelerated production of cultivated plants under conditions of controlled parameters], *Izvestiya VolgGTU* [News of VolgSTU], 2021, no. 3(250), pp. 66-68. doi: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-66-68 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Lebed N.I., Tokarev K.Ye., Nekhoroshev D.D., Aksenov M.P. [Research and modeling of operating modes of the software and hardware complex of the microclimate system based on the programmable microcontroller ATmega 2560], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 596-605. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.596-605 (In Russ., abstract in Eng.)

Simulation von Betriebsparametern des automatisierten Steuersystems der Anzeichen der Kontamination von Agrokulturen unter Bedingungen der klonalen Reproduktion durch digitale Farbmetriemethoden

Zusammenfassung: Es ist ein automatisiertes Modul zur Überwachung von Anzeichen der Pflanzenkontamination während der klonalen Mikrovermehrung mithilfe digitaler Kolorimetrie vorgeschlagen. Dabei sind die Kriterien für die Betriebsqualität des vorgeschlagenen Moduls berücksichtigt, insbesondere sind Faktoren ausgewählt, die die Effizienz des Systems beeinflussen. Die Bedingungen zur Bestimmung der Endwerte der Komponenten des additiven RGB-Farbmodells und der endgültigen tatsächlichen Farben sind analytisch begründet. Es ist eine Tabelle mit der Wahrheitsauslösung der Kontaminierungswarnung durch das Modul der Kontrolle der Kontaminationszeichen sowie eine logische Funktion in perfekter disjunktiver normaler Form entwickelt. Es ist ein Algorithmus zur automatisierten Kontrolle von Verunreinigungen im Nährmedium/Pflanzenobjekt (Abweichungen von den geregelten Indikatoren nach Farbmerkmalen) entwickelt.

Simulation des paramètres de fonctionnement du système automatisé de contrôle des signes de contamination des agro-cultures dans des conditions de reproduction clonale par des techniques de chromométrie numérique

Résumé: Est proposé un module automatisé de la surveillance des signes de contamination des plantes lors de la micro-multiplication clonale par chromométrie numérique. Sont examinés les critères de la qualité du module proposé, en particulier les facteurs qui influent sur l'efficacité du système. Sont analysées les conditions de la détermination des totaux des composantes du modèle RGB additif et des couleurs réelles correspondantes. Est élaborée le tableau de vérité de l'alerte d'identification de la contamination par le module de la surveillance des signes de contamination, ainsi qu'une fonction logique sous une forme normale disjointe parfaite. Est mis au point un algorithme pour le contrôle automatisé du contenu dans le milieu nutritif / végétal (écarts par rapport aux indicateurs réglementaires en fonction des caractéristiques de couleur).

Авторы: *Лебедь Никита Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и энергетические системы»; *Токарев Кирилл Евгеньевич* – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математическое моделирование и информатика»; *Ганич Дмитрий Сергеевич* – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение и энергетические системы», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград, Россия.

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДЕКОМПОЗИЦИИ

И. А. Глазкова, М. А. Ивановский✉,
С. С. Куприянова, Б. Х. М. Эль Эиссави

*Кафедра «Информационные системы и защита информации»,
ivanovski_62@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: групповая деятельность операторов; декомпозиция показателей эффективности; информационная система; комплекс средств автоматизации; полизргатическая система; формирование оценок функционирования; эффективность функционирования.

Аннотация: Рассмотрен процесс оценивания эффективности в ходе проектирования и функционирования информационной системы – сложной автоматизированной системы. Представлены варианты декомпозиции показателей эффективности информационной системы и оценок эффективности функционирования ее элементов. При этом система управления предполагается централизованной, однозвенной. Рассмотрены стандартные показатели процесса управления (оперативность, непрерывность, устойчивость и скрытность). Функционирование системы оценивается на основе фазовых траекторий эталонных значений.

Введение

Объективные трудности, связанные с выбором и формулировкой одного, единственного, всеобщего и полного показателя эффективности сложной системы, к которой относится информационная система, приводят к тому, что на практике широко используют не один общий, а множество частных показателей эффективности, совокупность которых с достаточной полнотой и точностью характеризует общий показатель эффективности (даже если его сформулировать и не удастся).

При разработке и внедрении информационной системы говорить о ее эффективности можно в двух аспектах. *Во-первых*, об эффективности применения информационной системы. Управление сложными системами осуществляется с использованием информационной системы (то есть о ее влиянии на ход и результат функционирования сложной системы управления), *во-вторых*, об эффективности функционирования комплексов средств автоматизации, используемых в системе управления (то есть о функциональной эффективности информационной системы, ее влиянии на выполнение системой управления своих функций).

Декомпозиция показателей эффективности

Выполняя декомпозицию информационной системы, будем подразумевать под ее элементами [1] комплекс средств автоматизации (КСА), персонал (эргатические элементы), автоматизированное рабочее место (АРМ).

В случае групповой работы операторов будем рассматривать информационную систему как полиэргатическую систему управления, а эргатические элементы – как элементы системы «человек – техника» (СЧТ) [2].

Одним из основных показателей функциональной эффективности информационной системы является оперативность управления – способность органов управления выполнять возложенные на них задачи в течение времени, не превышающего заданного, то есть это способность руководства решать задачи в ограниченные сроки, своевременно реагировать на все изменения обстановки и влиять на ход выполнения задач.

В общем виде время функционирования информационной системы, соответствующее одному циклу управления $T_{упр}$, можно представить в виде

$$T_{упр} = T_Z + T_{и},$$

где T_Z – длительность цикла управления в одном его звене; $T_{и}$ – время исполнения решения управляющим объектом.

Для каждой реальной системы управления существует критическое время функционирования в одном звене управления $T_{кр}$, при превышении которого действия управляемого объекта, определенные решением управляющего объекта, будут уже неэффективны или даже невозможны. Значит $T_{упр} \leq T_{кр}$, отсюда $T_{кр} \geq T_Z + T_{и}$, поэтому $T_Z \leq T_{кр}$.

Иногда величину $T_{кр} - T_{и}$ называют допустимым временем цикла управления в звене управления, то есть $T_{доп} = T_{кр} - T_{и}$.

Таким образом, если $T_Z \leq T_{доп}$, то система управления отвечает требованиям по оперативности управления, в противном случае – не удовлетворяет.

Величина $T_{и}$ определяется оперативностью исполнения решения управляющими объектами.

Время длительности цикла управления в одном звене управления определяется

$$T_Z = T_c + T_p + T_d,$$

где T_c , T_p , T_d – время соответственно сбора (уточнения) информации, выработки решения и доведения решения до управляемых объектов.

Если в одном звене управления количество управляемых объектов n (рис. 1), то длительность цикла управления будет

$$T_Z = \max T_{ci} + T_p + \max T_{di},$$

где $i = \overline{1, n}$ – номер управляемого объекта.

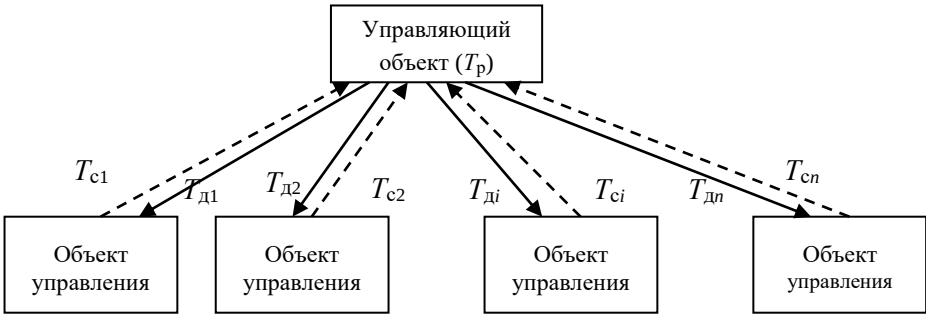


Рис. 1. Структура однозвенной централизованной системы управления

На практике значительно чаще встречаются централизованные системы управления, состоящие из нескольких m звеньев управления. Среди других показателей функциональной эффективности информационной системы и ее элементов можно использовать: вероятность своевременной передачи сообщения на информационном направлении – вероятностно-временные показатели; вероятность выхода из строя элементов – показатели устойчивости функционирования и ряд др. Практически получить функциональную зависимость, связывающую множество частных показателей эффективности системы в целях ее создания, бывает чрезвычайно сложно.

Проблема формулирования критерия оценки эффективности информационной системы может быть решена путем свертывания частных показателей эффективности системы в некоторый единый критерий эффективности. Наиболее распространен следующий способ свертывания частных показателей эффективности. Все частные показатели эффективности информационной системы считаются одинаково хорошими (ценными). Множество значений частных показателей разбивается на удовлетворительные и неудовлетворительные. Для облегчения задачи выбора показателей эффективности на рис. 2 изображена схема взаимосвязи показателей эффективности.

В ходе оценки эффективности функционирования элементов информационной системы одно из важнейших значений имеет объективное оценивание эффективности деятельности операторов при выполнении заданий.

Из системно-динамического представления функционирования систем «человек – техника» следует, что оценивание эффективности является характеристикой уровня достижения системой поставленных перед ней целей в реальных условиях функционирования с учетом фактических затрат на достижение целей [2 – 4].

Процесс формирования оценок функционирования СЧТ может быть представлен как функционирование динамической системы формирования оценок (СФО), связанной с оцениваемой СЧТ. Следует отметить, что в качестве СФО в настоящее время могут выступать как человек (инструктор, эксперт), так и автоматические системы.

Система формирования оценок, являясь динамической, задается пятью компонентами $G = (U_G, X_G, Y_G, R_G, F_G)$, где U_G, X_G, Y_G – множества объектов входа, состояния и выхода соответственно, R_G, F_G – семейства выходных функций и функций перехода состояния СФО соответственно. Введем также фазовое пространство функционирования СЧТ

$$Q = U \times X \times Y. \quad (1)$$

Множество X_G объектов состояния оценивающей системы может быть представлено как объединение двух непересекающихся множеств, одно из которых V содержит объекты состояния, необходимые и достаточные для формирования оценок (множество «объективных» переменных состояния оценивающей системы), а второе W объединяет объекты состояния СФО, приводящие к смещению оценок (множество «субъективных» объектов состояния) [5, 6].

Тогда процесс объективного оценивания описывается выражением

$$Y_G = R_G(U_G, V); \quad V = X_G \setminus W. \quad (2)$$

Определение оценивающей системы в виде (2) означает, что объективность формируемых оценок достигается тогда и только тогда, когда при произвольном изменении состояния оценивающей системы, формируемые ею оценки не зависят от объектов, принадлежащих множеству «субъективных» объектов состояния оценивающей системы.

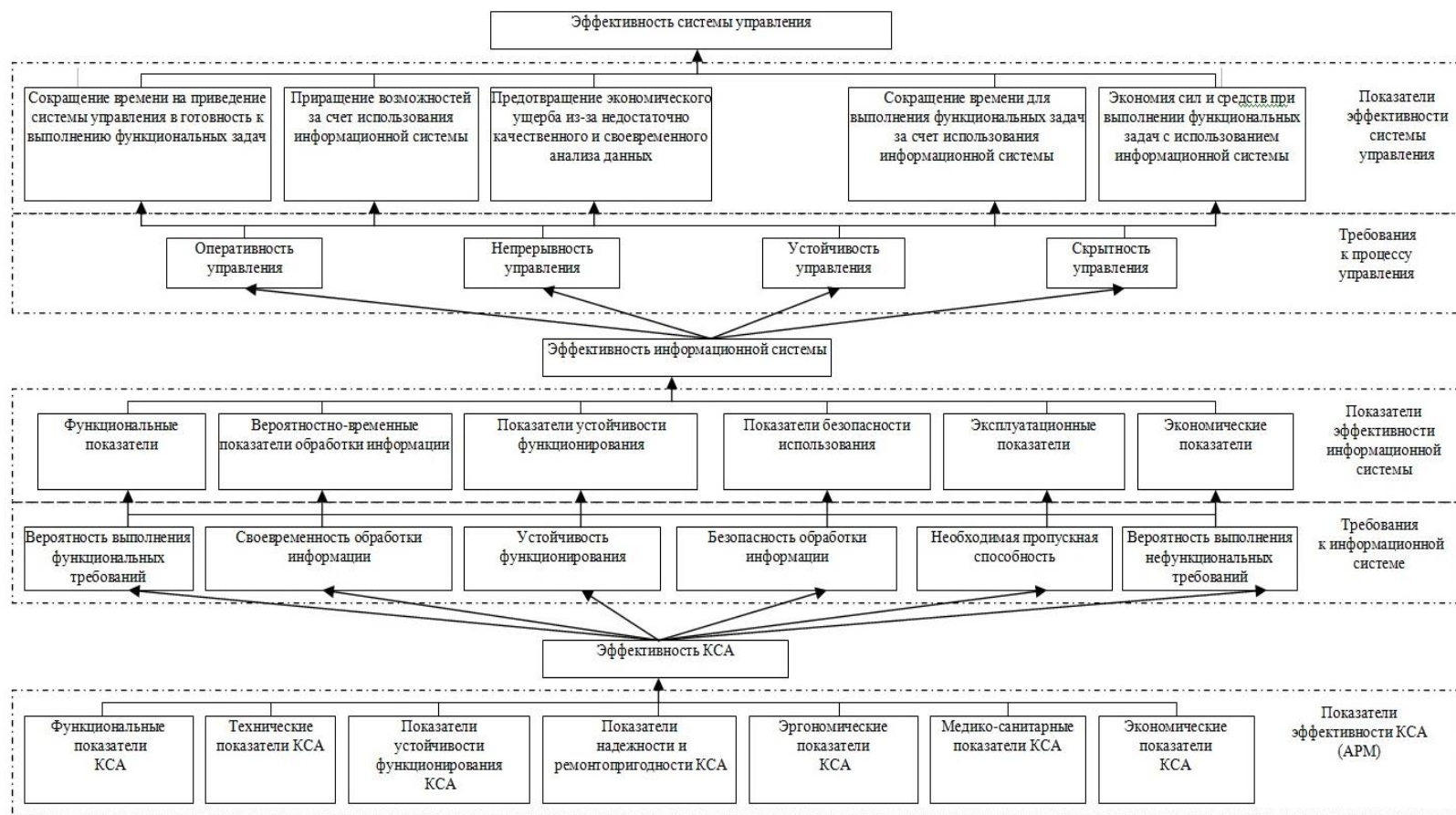


Рис. 2. Схема взаимосвязи показателей эффективности

Полная объективность оценок достижима лишь при выполнении оценивания с помощью автоматических систем, так как только для них множество W является пустым, что приводит к выводу о необходимости построения автоматических систем оценивания функционирования СЧТ [7, 8].

Классы оценок СЧТ целесообразно определять тем, какие из компонентов системно-динамической модели СЧТ и(или) их совокупностей служат входными объектами оценивающей системы (2). Тогда можно выделить основные классы оценок функционирования СЧТ (табл. 1): входных объектов; результатов функционирования; состояния; фазовых координат; процессов получения результатов функционирования; процессов изменения состояния. Возможно использование обобщенных и комплексных оценки функционирования.

Всякая СЧТ создается для достижения определенных целей, получения конкретного продукта труда, выполнения необходимых функций, то есть СЧТ – это целенаправленная система. Тогда для нее существуют такие подмножества элементов, описывающих ее компоненты, которые обращают в экстремум (максимум или минимум) комплексную и обобщенную оценки функционирования СЧТ. В указанных подмножествах компонентов СЧТ отметим элементы, которые обращают в экстремум оценки соответствующих компонентов [9].

Назовем эталонной фазовой точкой такую точку фазового пространства системы, координатами которой являются отмеченные элементы множеств объектов входа, состояния и выхода системы. Траектории, которые описывают эталонная фазовая и отмеченные точки множеств объектов входа, состояния и выхода, будем называть эталонными траекториями в соответствующих пространствах. Соответствующие эталонным траекториям семейства выходных функций и функций перехода состояний назовем эталонными функциями [10].

Эталонной СЧТ будем называть динамическую систему, заданную своими эталонными компонентами:

$$S_E = (U_E, X_E, Y_E, R_E, F_E); \tag{3}$$

$$Q_E = U_E \times X_E \times Y_E. \tag{4}$$

Множество значений оценок функционирования СЧТ $e_{U_E}, \dots, e_{S_E}$, для которых построены эталонные траектории, отображения и, в конечном счете, эталонная СЧТ, образуют траектории в пространстве выходных объектов оценивающей

Таблица 1

Классы оценок функционирования СЧТ

Наименование класса	Вход СФО	Оператор оценивания	Выход СФО
Оценка входных объектов СЧТ C_U	U	R_G^U	e_U
Оценка результатов функционирования СЧТ C_Y	Y	R_G^Y	e_Y
Оценка состояния СЧТ C_X	X	R_G^X	e_X
Оценка процессов получения продукта СЧТ C_R	R	R_G^R	e_R
Оценка процессов изменения состояния СЧТ C_F	F	R_G^F	e_F
Обобщенная оценка функционирования СЧТ C	S	R_G^S	e_S

системы. Назовем их траекториями оценок эталонов по соответствующим классам. Функционирование оцениваемой СЧТ описывается следующими характеристиками:

- фактической фазовой точкой;
- фактическими фазовыми траекториями системы и ее компонентов;
- семействами фактических выходных и переходных функций;
- оцениваемой (фактической) СЧТ;
- оценками фактической работы СЧТ и траекториями данных оценок по соответствующим классам [11].

Тогда эффективностью функционирования СЧТ назовем меру близости значений фактических характеристик СЧТ к значениям эталонных характеристик. Оценки эффективности могут быть получены с помощью объективной СФО функционирования вида:

$$D = (U_D, X_D, Y_D, R_D, F_D); \tag{5}$$

$$Q_D = U_D \times X_D \times Y_D, \tag{6}$$

где в качестве входных объектов необходимо принять декартовы произведения пар множеств характеристик эталонного и фактического функционирования.

В таблице 2 представлены классы оценок эффективности функционирования СЧТ, где символом «Ф» отмечены компоненты динамического описания фактического функционирования СЧТ.

Оценки эффективности функционирования СЧТ могут определяться как на основании элементов множеств эталонных и фактических фазовых траекторий СЧТ, так и при использовании оценок элементов данных множеств. Представляется очевидным и определение понятия оценки эффективности функционирования СЧТ, как результата определения фактического уровня достижения поставленных целей в фактических условиях с учетом уровня фактических затрат [12, 13].

Таблица 2

Классы оценок эффективности функционирования СЧТ

Наименование класса	Вход СФО	Оператор оценивания	Выход СФО
Оценки соответствия фактических значений входных объектов СЧТ их эталонным значениям A_U	$U_{\Phi} \times U_E$	R_D^U	P_U
Оценки качества функционирования СЧТ A_Y	$Y_{\Phi} \times Y_E$	R_D^Y	P_Y
Оценки отклонения фактических значений объектов состояния СЧТ от эталонных значений A_X	$X_{\Phi} \times X_E$	R_D^X	P_X
Оценки отклонения фактической фазовой траектории от эталонной A_Q	$Q_{\Phi} \times Q_E$	R_D^Q	P_Q
Оценки рациональности фактического способа реализации функции A_R	$R_{\Phi} \times R_E$	R_D^R	P_R
Оценки соответствия фактической динамики процессов изменения состояния СЧТ динамике эталонной СЧТ A_F	$F_{\Phi} \times F_E$	R_D^F	P_F
Оценки эффективности функционирования СЧТ A_S	$S_{\Phi} \times S_E$	R_D^S	P_S

Заключение

Таким образом, оценивание состояния системы «человек – техника» представляет собой двухэтапный процесс. На *первом* этапе выполняется оценивание переменных, характеризующих текущее функционирование системы «человек – техника». На *втором* – осуществляется оценивание эффективности функционирования, используя для этого оценки, полученные на первом этапе, и эталонные траектории с функции. Сформированные оценки являются информационной основой принятия решений при управлении состоянием системы «человек – техника». При формировании оценок эффективности функционирования системы «человек – техника» должны быть реализованы следующие классы алгоритмов оценивания: качества результатов деятельности; рациональности операторской деятельности субъекта деятельности; переменных пространства профессионального состояния оператора; эффективности операторской деятельности человека.

Список литературы

1. Алексеев, В. В. Методология исследования структурных характеристик сложных систем / В. В. Алексеев // Нейрокомпьютеры и их применение : тезисы докл. XVI Всерос. научн. конф. (Москва, 13 марта 2018 г.). – М., 2018. – С. 24 – 28.
2. Ломов, Б. Ф. Методологические и теоретические проблемы психологии / Б. Ф. Ломов. – М. : Наука, 1984. – 444 с.
3. Анализ и синтез модульных сетевых информационных систем в интересах повышения эффективности целенаправленных процессов : монография / В. В. Алексеев, Ю. Ю. Громов, А. В. Яковлев, О. Г. Старожилов. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена ; Гамбург : Нобелистика, 2012. – 130 с.
4. Формализация задачи поддержки принятия решений при управлении качеством функционирования структурного элемента деятельности в организационно-технической системе / К. А. Алейникова, В. Г. Мокрозуб, А. П. Рыжков, В. Е. Дидрих // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 376 – 386. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.376-386
5. Безбогов, А. А. Теория, модели и алгоритмы оценивания состояния эргатических систем управления: на примере эргатических систем управления летательными аппаратами / А. А. Безбогов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.16. – Тамбов, 1996. – 340 с.
6. Безбогов, А. А. Математические методы и модели в оценивании эргатических систем управления / А. А. Безбогов // Математическое моделирование информационных и технологических систем : сб. науч. тр. (Воронеж, 10 – 14 мая 2000 г.) – Воронеж, 2000. – № 4. – С. 8 – 11.
7. Белов, М. В. Модели технологий / М. В. Белов, Д. А. Новиков. – М. : Лепант, 2019. – 160 с.
8. Математические основы управления проектами : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Менеджмент» / С. А. Баркалов [и др.] ; ред. В. Н. Бурков. – М. : Высшая школа, 2005. – 423 с.
9. Емельянов, С. В. Многокритериальные методы принятия решений / С. В. Емельянов, О. И. Ларичев. – М. : Знание, 1985. – 32 с.
10. Мартыанов, Е. И. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем / Е. И. Мартыанов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 336 – 344. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344
11. Математическая модель управления качеством информационного процесса в эрготехнических системах / А. Н. Талах, В. В. Алексеев, А. О. Жуков, А. В. Кулаков, В. М. Тютюнник // Инженерная физика. – 2018. – № 2. – С. 25 – 30.

12. Фишберн, П. С. Теория полезности для принятия решений / П. С. Фишберн ; пер. с англ. В. Н. Воробьевой и А. Я. Кируты ; под ред. Н. Н. Воробьева. – М. : Наука, 1978. – 352 с.

13. A Combinatorial Model for Determining Information Loss in Organizational and Technical Systems / A. V. Yakovlev, V. V. Alekseev, M. V. Volchikhina, S. V. Petrenko // *Mathematics*. – 2022. – Vol. 10, No. 19. – P. 3448. doi: 10.3390/math10193448

Algorithms for Assessing the Efficiency of the Information System and its Elements Based on the Principle of Decomposition

I. A. Glazkova, M. A. Ivanovsky✉, S. S. Kupriyanova, Badr Khalil Mahmud El Eissawi

Department of Information Systems and Information Security, ivanovskiy_62@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: group activity of operators; decomposition of efficiency indicators; Information system; a set of automation tools; polyergative system; generation of performance assessments; operating efficiency.

Abstract: The process of assessing efficiency during the design and operation of an information system – a complex automated system – is considered. Options for decomposition of information system efficiency indicators and assessments of the effectiveness of the functioning of its elements are presented. In this case, the control system is assumed to be centralized, single-link. Standard indicators of the management process (operability, continuity, stability and secrecy) are considered. The functioning of the system is assessed based on the phase trajectories of the reference values.

References

1. Alekseyev V.V. *Neyrokompyutery i ikh primeneniye: tezisy dokl. XVI Vseros. nauchn. konf.* [Neurocomputers and their application: abstracts of reports. XVI All-Russian scientific conf.], (Moscow, 13 March 2018), Moscow, 2018, pp. 24-28. (In Russ.)
2. Lomov B.F. *Metodologicheskiye i teoreticheskiye problemy psikhologii* [Methodological and theoretical problems of psychology], Moscow: Nauka, 1984, 444 p. (In Russ.)
3. Alekseyev V.V., Gromov Yu.Yu., Yakovlev A.V., Starozhilov O.G. *Analiz i sintez modul'nykh setevykh informatsionnykh sistem v interesakh povysheniya effektivnosti tselenapravlennykh protsessov : monografiya* [Analysis and synthesis of modular network information systems in the interests of increasing the efficiency of targeted processes: monograph], Tambov; Moscow; St. Petersburg; Baku; Vena; Gambur: Nobelistika, 2012, 130 p. (In Russ.)
4. Aleynikova K.A., Mokrozub V.G., Ryzhkov A.P., Didrikh V.Ye. [Formalization of the problem of decision support in managing the quality of functioning of a structural element of activity in an organizational and technical system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 376-386. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.376-386 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Bezbogov A.A. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 1996, 340 p. (In Russ.)
6. Bezbogov A.A. *Matematicheskoye modelirovaniye informatsionnykh i tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr.* [Mathematical modeling of information and technological systems: collection. scientific tr.], (Voronezh, 10-14 May 2000), Voronezh, 2000, no. 4, pp. 8-11. (In Russ.)

7. Belov M.V., Novikov D.A. *Modeli tekhnologiy* [Models of technologies], Moscow: Lenand, 2019, 160 p. (In Russ.)
8. Barkalov S.A. [et al.]; Burkov V.N. (Ed.). *Matematicheskiye osnovy upravleniya proyektami: uchebnoye posobiye* [Mathematical foundations of project management: a textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 423 p. (In Russ.)
9. Yemel'yanov S.V., Larichev O.I. *Mnogokriterial'nyye metody prinyatiya resheniy* [Multicriteria methods of decision making], Moscow: Znaniye, 1985, 32 p. (In Russ.)
10. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V., Alekseyev V.V. [Problem-oriented control system 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. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Talakh A.N., Alekseyev V.V., Zhukov A.O., Kulakov A.V., Tyutyunnik V.M. [Mathematical model of information process quality management in ergotechnical systems], *Inzhenernaya fizika* [Engineering physics], 2018, no. 2, pp. 25-30. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Fishburn P.C. *Utilitu theory for decision making*, New York, 1970.
13. Yakovlev A.V., Alekseev V.V., Volchikhina M.V., Petrenko S.V. A Combinatorial Model for Determining Information Loss in Organizational and Technical Systems, *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 19, pp. 3448. doi: 10.3390/math10193448
-

Leistungsbewertungsalgorithmen der Funktionsweise des Informationssystems und seiner Elemente basierend auf dem Prinzip der Dekomposition

Zusammenfassung: Es ist der Prozess der Bewertung der Effizienz bei der Projektierung und dem Funktionieren des Informationssystems, eines komplexen automatisierten Systems, untersucht. Es sind Varianten der Aufspaltung der Leistungsindikatoren des Informationssystems und der Einschätzungen der Effektivität des Funktionierens seiner Elemente vorgestellt. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass das Steuerungssystem zentralisiert und eingliedrig ist. Die Standardwerte des Managementprozesses (Reaktionsfähigkeit, Kontinuität, Stabilität und Geheimhaltung) sind berücksichtigt. Die Funktionsweise des Systems wird anhand der Phasenbahnen der Referenzwerte beurteilt.

Algorithmes d'évaluation d'efficacité du fonctionnement du système informatique et de ses éléments à la base du principe de la décomposition

Résumé: Est examiné le processus d'évaluation de l'efficacité de la conception et du fonctionnement d'un système d'information - un système automatisé complexe. Sont présentées des options pour la décomposition des indicateurs de la performance du système d'information et des évaluations de l'efficacité de ses éléments. Le système de la gestion est censé d'être centralisé, à un seul niveau. Sont examinés les indicateurs standard du processus de la gestion (rapidité, continuité, durabilité et discrétion). Est évalué le fonctionnement du système à la base des trajectoires de phase des valeurs de référence.

Авторы: *Глазкова Инга Александровна* – магистрант; *Ивановский Михаил Андреевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации»; *Куприянова Светлана Сергеевна* – преподаватель многопрофильного колледжа; *Эль Эисави Бадр Халил Махмуд* – аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

С. В. Фролов✉, Т. А. Фролова, В. О. Лычагина, Д. И. Трушин,
И. А. Шаталова, Е. С. Ширкина, С. И. Юрлов, О. А. Яркин

*Кафедра «Биомедицинская техника», bmt@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: алгоритмы; биотехническая система; датчики; лазерная досветка; математическая модель; микроклимат; «умная» теплица; управляющее устройство.

Аннотация: Введена новая группа биотехнических систем – биотехнические системы для выращивания растений (БТС-Р). Представлены этапы разработки БТС-Р, которая позволяет выращивать растения в закрытом помещении с минимальной затратой времени и усилий. Ключевой особенностью БТС-Р является использование лазерной досветки. Отметим, что условия выращивания в БТС-Р максимально приближены к естественным, в отличие от продукции, выращенной по технологии гидропонике, которую предлагают супермаркеты.

Введение

В настоящее время наблюдается рост производства и использования отдельных элементов и комплексных решений для организации «умного» домашнего пространства. Одним из девайсов для «умного» дома может стать «умная» мини-теплица. «Умная» теплица для растений – это использование технологий и программного обеспечения для управления процессом их выращивания. Автоматизация процессов роста растений может включать в себя различные методы, что в свою очередь значительно упрощает процесс выращивания.

Тренд на экологизацию – одна из самых важных и долгосрочных тенденций современности. Одним из его направлений является употребление экологически чистой продукции. Каждый понимает, что такую продукцию не всегда можно купить, но всегда можно вырастить, с этим и связана актуальность «умных» мини-теплиц. В «умных» домашних теплицах можно выращивать не только традиционные овощи и зелень, но и экзотические, редкие и лекарственные растения, а также использовать теплицу как эстетическое дополнение к дизайну интерьера.

Существует два вида «умных» минитеплиц: growbox и growtent. Принципиальное отличие growbox и growtent заключается в том, что первый представляет собой коробку из твердых материалов, второй – конструкцию из ткани, натянутой на каркас. Оба вида на данный момент оснащаются компонентами и датчиками для автоматизации и внедрения их в будущем в системы «умного» дома.

Тенденции развития теплиц для выращивания растений

Идея выращивания растений в контролируемых человеком зонах существует еще со времен Древнего Рима. Император Тиберий любил ежедневно съедать по огурцу, так как зимой их было сложно вырастить, люди начали задумываться, как самостоятельно контролировать климат на ограниченной территории. Римские

садоводы использовали парниковые системы. Огурцы размещались в конструкциях из телег, днем телеги вывозили под солнце, а ночью прятали в помещениях [1].

В XIII веке теплицы начали активно распространяться в Италии для размещения экзотических растений, которые путешественники привозили из тропиков. Оттуда появилось название «Ботанический сад». Строения, в которых стало возможно вручную регулировать температуру, появились значительно позже (около 1450 г.). В Корее разработали теплицу, описание которой содержит возможность регулировки температуры и влажности для разных растений и культур. В Европе такие конструкции появились лишь в XVII веке – сначала в Нидерландах, а затем в Англии. Первые парники появились в нашей стране в конце XVI в., а в период правления Петра I тепличным делом занялись уже на уровне страны [2].

Многочисленные парники стали появляться повсеместно с 1960 г., когда полиэтиленовая пленка стала широко доступна. Это привело к тому, что парники стали строиться даже на небольших фермах и садовых участках. С 1980-х годов появились современные конструкции, оснащенные отоплением, дополнительным освещением и системами поддержания необходимого микроклимата [1].

Параллельно с развитием теплиц изучалось питание растений. Самой ранней опубликованной работой (1627 г.) о выращивании наземных растений без почвы была книга Фрэнсиса Бэкона. Само слово «гидропоника» введено доктором В. Ф. Герике в 1936 г. для описания выращивания растений в растворе воды и растворенных питательных веществах [3].

Что касается компактных теплиц, они начали развиваться в шестидесятых годах, когда появились дуговые натриевые лампы с наличием высокого давления. Такие теплицы были названы growbox, что в переводе означает «коробка для выращивания». В настоящее время growbox-технологии широко распространены повсюду в мире и пользуются большим спросом [4].

Прогресс не стоит на месте, тепличные конструкции постоянно нуждаются в усовершенствовании, поэтому многие компании и научные разработчики проводят исследования и пытаются создать свою оптимальную систему для выращивания растений в помещении.

В работе [5] предлагается усовершенствовать установку для выращивания агрокультур в домашних условиях системой управления, которая обеспечивает контроль уровня освещенности, температуры и влажности воздуха, а также измеряет влажности почвы и уровень воды в резервуаре при помощи датчиков. Авторы [6] разработали автоматизированный вид growbox для беспочвенного выращивания растений посредством аэропонии. В исследовании [7] предлагается использовать нейросетевой регулятор для управления процессом выращивания овощей в теплице, который позволил бы повысить качество управления объектом за счет повышения адаптационных способностей системы. Проект комнатной теплицы запатентован авторами [8]. Он представляет собой теплицу, в корпусе которой установлены источник света и насос. Она оснащена открывающейся прозрачной стеклянной дверцей с закрепленным на ней сенсорным блоком управления, задняя стенка корпуса снабжена вытяжным вентилятором и светоотражающим экраном. Кроме того, в корпусе установлена система управления и контроля, включающая датчики, передающие информацию о микроклимате. В Индонезии представлена конструкция умной теплицы growbox с системой мониторинга температуры и влажности через Интернет с использованием датчиков, причем состояние установки и окружающей среды можно легко контролировать в зависимости от сетевого трафика и условий сети [9].

Многие исследователи создают не всю систему, а меняют и дорабатывают отдельные ее части. Основным направлением работы является искусственная досветка, так как от света напрямую зависит питание растений, а соответственно

их рост и развитие. К примеру, авторы [10] разработали светотехническую модель, на основе которой проще сделать обоснованный выбор и внедрить светодиодные источники света, что в конечном итоге способствует созданию более эффективных систем growbox. В работе [11] проведен эксперимент по определению спектра света, оказывающего большее влияние на рост, урожайность и физиологические компоненты, связанные с фотосинтезом для оптимального подбора светодиодного освещения растений.

Помимо этого, ведутся разработки для промышленных теплиц и тепличных хозяйств. Одной из новейших стала работа авторов [12], которые представили современные исследования по применению технологий искусственного интеллекта (ИИ) в умных теплицах. Ключевые применяемые технологии – роботизированные системы для внесения пестицидов, орошения, сбора урожая, основанные на биоалгоритмах.

Каждая из работ вносит определенный вклад в развитие домашних и промышленных теплиц. Однако каждая из них усовершенствует теплицы лишь частично. Происходит минимализация человеческого вмешательства в процессы выращивания, то есть повышается и уровень автоматизации. Актуальной задачей является разработка «умной» теплицы, в которой решаются задачи ускорения роста и развития растений.

Конструкция и состав БТС-Р

В работе спроектирована и разработана «умная» домашняя теплица (рис. 1), которую можно отнести к биотехническим системам (БТС). Как известно, под БТС понимается особый класс технических систем, представляющих собой совокупность биологических и технических элементов, связанных между собой в едином контуре управления. По характеру целевой функции БТС делятся на три группы: БТС медицинские (БТС-М), БТС эргатического типа (БТС-Э) и БТС целенаправленного управления поведением целостного организма (БТС-У) [13].

Так как представленная БТС по характеру целевой функции не подходит ни к одному из трех типов, введем новую группу – биотехнические системы для выращивания растений (БТС-Р).

Изделие БТС-Р представлено как инновационное устройство, которое позволяет выращивать растения в закрытом помещении с минимальной затратой времени и усилий. БТС-Р оснащена современной системой управления, которая контролирует и регулирует влажность, температуру, освещение и другие параметры, необходимые для роста и развития растений.

В данном устройстве можно выращивать как традиционные овощи, так и экзотические растения. Помимо этого, «умные» теплицы дают возможность выращивать лекарственные растения. Это может быть полезно для людей, которые живут в неблагоприятных климатических условиях, не имеют возможности обеспечить подходящее место для выращивания или просто любят заботиться о своем здоровье.

Одним из преимуществ умной домашней теплицы является ее высокая эффективность. Благодаря оптимальным условиям для роста, урожайность повышается, а временные затраты на уход снижаются.

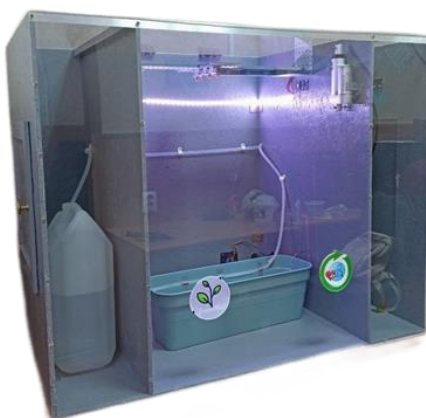


Рис. 1. Внешний вид БТС-Р для выращивания растений

Первый этап в реализации устройства – создание структурной схемы технических средств БТС-Р, состоящей из четырех основных блоков: устройств внешнего управления (УВУ), управления и отображения БТС-Р (УиО), воздействующих устройств (ВУ), датчиков (Д) и источник бесперебойного питания (ИБП) (рис. 2).

Управление через блок УВУ может осуществляться двумя способами: с помощью интерфейса БТС-Р (символьный дисплей и кнопки) и телефона (GSM/GPRS Shield).

В блок УиО входят: плата Piranha Ultra R3, которая осуществляет управление всей системой; символьный дисплей; пульт управления и устройства для периферийного подключения блоков ВУ и Д.

Блок Д содержит датчики для контроля за микроклиматом: температуры почвы; влажности почвы, температуры и влажности воздуха, уровня жидкости в емкости для полива и часы реального времени.

В блок ВУ входят все элементы, которые тем или иным образом влияют на микроклимат системы, а именно:

- лазерные модули, с помощью которых осуществляется лазерная досветка;
- светодиодный светильник для поддержания освещения определенной интенсивности;
- линейный актуатор, осуществляющий режим проветривания;
- мембранный насос, предназначенный для полива;
- инфракрасная лампа для нагревания воздуха;
- вентиляторы для циркуляции воздуха внутри системы.

Следующий этап реализации – составление спецификации на узлы и элементы БТС-Р в соответствии со структурной схемой. Схема подключения используется для указания принципов соединения различных электрических или электронных блоков в единую систему (рис. 3).

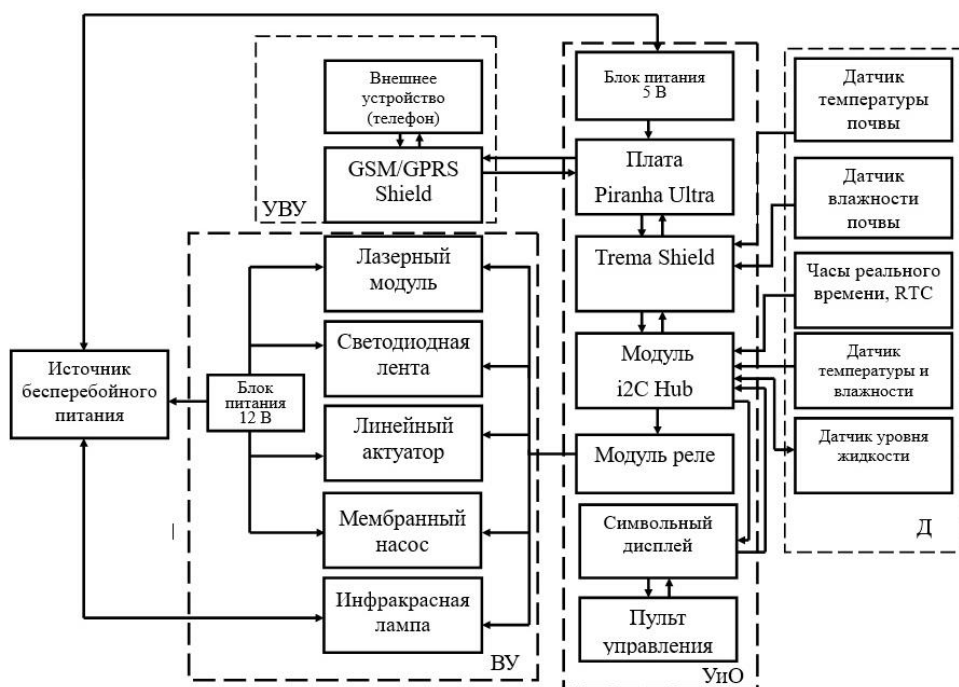


Рис. 2. Структурная схема технических средств БТС-Р

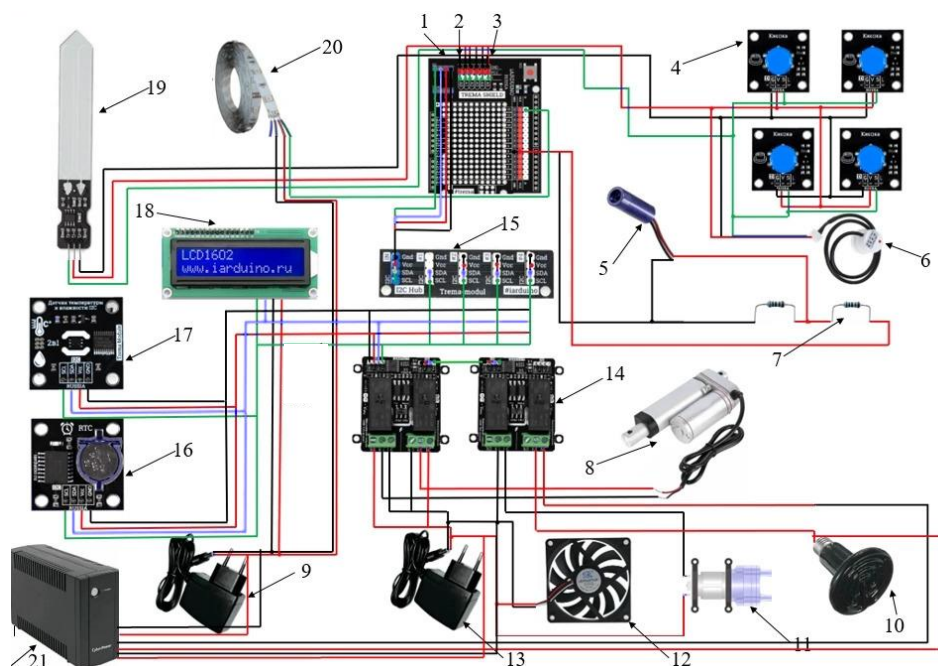


Рис. 3. Схема подключения:

1 – плата Piranha Ultra R3; 2 – устройство для подключения Trema Shield; 3 – GSM/GPRS Shield для подключения телефона; 4 – кнопка (Trema-модуль V2.0); 5 – лазерный модуль; 6 – бесконтактный датчик уровня жидкости ХКС-Y25-V; 7 – набор резисторов MAXI для Arduino; 8 – линейный актуатор XDHA12-50; 9 – источник питания на 12В (2А); 10 – ИК-лампа; 11 – мембранный насос 385; 12 – вентиляторы 12 В; 13 – источник питания на 5 В; 14 – модуль реле, 2-канала, FLASH-I2C; 15 – i2C Hub для подключения периферийных устройств; 16 – часы реального времени, RTC; 17 – датчик температуры и влажности, FLASH-I2C; 18 – символьный дисплей LCD1602 ИС/I2C; 19 – датчик влажности почвы, емкостной; 20 – светодиодный светильник ФОТОН ПРОМ; 21 – ИБП Cyberpower UTC650E

Не менее важный этап – работа над конструкционным исполнением БТС-Р, а именно подбор оптимальных габаритов и материалов для ее изготовления. БТС-Р имеет оптимальные габариты для использования ее в помещении, см: длина – 100; глубина – 60; высота – 80. Выбранные габариты подходят для выращивания большинства популярных овощей, зелени, ягод и цветов.

Конструкция БТС-Р предполагает наличие трех отсеков, каждый из которых несет за собой определенную роль (рис. 4). Крайние отсеки симметричны и имеют размеры, см: длина – 20; высота – 80; глубина – 60. В левом отсеке находится емкость для полива, которая специально размещена отдельно, чтобы вода в БТС-Р не контактировала с электроникой. В правом отсеке расположена электронная составляющая БТС-Р, а именно центр управления системой – микроконтроллер. Главный отсек БТС-Р, где располагаются растения, является

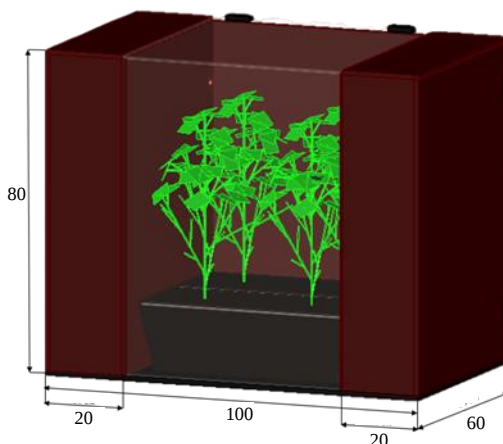


Рис. 4. 3D-модель каркаса БТС-Р

самым большим, см: длина – 60; высота – 80; глубина 60. Помимо растений, внутри располагаются датчики, которые контролируют микроклимат и воздействующие устройства.

Корпус БТС-Р изготовлен из влагостойкой ориентированно-стружечной плиты (OSB-3) толщиной 9 мм, и покрыт глянцевой серой водоотталкивающей краской, что делает систему максимально неподверженной к воздействию воды. Крышка и передняя стенка изготовлены из органического стекла толщиной 5 мм для наблюдения за растениями и демонстрации работы системы. За счет своей герметичности система гарантирует чистоту на рабочем месте.

На основе выбора габаритов и материалов разработана 3D-модель каркаса для визуализации БТС-Р в программе AutoCAD.

Реализация искусственного освещения и лазерной досветки в БТС-Р

Так как освещение играет значимую роль для растительности, подобрать оптимальное освещение было крайне важно и первоначально. Освещение может влиять на такие аспекты, как скорость роста, формирование плодов, цвет и размер листьев, а также устойчивость к болезням и вредителям.

Правильное освещение также может улучшить качество воздуха внутри БТС-Р, где растут растения, за счет поглощения углекислого газа и выделения кислорода. Выбор типа освещения и его интенсивности зависит от вида растения, его возраста, места произрастания и других факторов.

Свет для растений может быть представлен в виде ламп, прожекторов или светодиодных панелей, которые обеспечивают определенный спектр света, имитирующий солнечный.

В БТС-Р в качестве источника освещения предлагается использовать светодиодный светильник ФОТОН ПРОМ со следующими характеристиками:

Световой поток, Лм.....	3906
Цветность.....	Естественный белый
Мощность светильника, Вт ...	25
Цветопередача, Ra.....	80
Защита от пыли и влаги	IP65
Вид крепления	Накладной/подвесной
Габариты, мм	430 × 61 × 6

С помощью люксметра измерена фактическая освещенность в БТС-Р. Данные с прибора составляют 7635 лк. Исходя из того, что растениям в среднем для ускоренного роста и развития необходима освещенность, равная 6000 лк, делаем вывод, что лампа, которая используется в БТС-Р, является оптимальным решением. С учетом всех потребностей подобраны остальные комплектующие системы.

Следующий этап реализации – детальное изучение БТС-Р как объекта управления и составление алгоритма управления. В БТС-Р управление осуществляется в автоматизированном режиме. Развитие растений в БТС-Р разделялось на этапы, для которых определялись параметры микроклимата, которые необходимо поддерживать постоянными для успешного выращивания. Для каждого цикла такие характеристики различны, переключение между циклами происходит автоматически.

Управление БТС-Р делится на два режима работы: ручной и автоматический. В ручном режиме можно задать любые параметры для температуры и влажности воздуха, влажности почвы, интенсивность для светодиодной досветки, время лазерной досветки, тем самым создав оптимальные условия для выращивания любого растения. В автоматическом режиме работы созданы программы выращивания для двух растений: базилика и томата. В программах выращивания заранее прописаны оптимальные условия для роста и развития растений. На этом этапе

разработан программный код для управления БТС-Р. Микроконтроллеры Arduino программируются на специальном языке, основанном на C/C++.

В отличие от существующих теплиц, разрабатываемая имеет ряд преимуществ. Первым и главным является наличие лазерной досветки. Суть лазерной досветки заключается в следующем. Длины светового дня и интенсивности света обычно не хватает растениям для полноценной вегетации. Благодаря лазерному излучению растения становятся более восприимчивыми к положительным влияниям среды, в нашем случае, к светодиодной досветке [14]. Лазер обладает выраженным фоторегуляторным действием, то есть лучше регулирует процессы жизнедеятельности в растительном организме. Связано это с высокой упорядоченностью фаз излучения фотонов лазера. Лазерный луч подобен первому солнечному лучу, включается в 6:00 утра на несколько минут, тем самым пробуждая растение. В качестве досветки используются четыре лазерных модуля с длиной волны 660 нм и мощностью 25 мВ [15]. Еще одним не менее важным преимуществом является оповещение пользователя о критических ситуациях.

Предотвращение критических состояний БТС-Р

В «умной» теплице существует несколько критических состояний, одно из которых – прекращение работы системы капельного автополива, за счет того что закончилась вода в емкости. Система капельного полива работает с помощью мембранного насоса, к которому прикреплены два шланга. Мембранный насос предназначен для перекачивания различных жидкостей. Жидкости всасываются в центральный патрубок и выходят через крайний. Когда вода в емкости заканчивается, насос не прекращает свою работу, что может повлечь за собой перебои и поломки в системе автополива. Для того чтобы найти выход из данного критического состояния, важно правильно подобрать датчик, который будет контролировать уровень жидкости в емкости.

Не менее важная критическая ситуация – внезапное отключение электричества в помещении, где находится БТС-Р. Для этого в комплектации с БТС-Р используется источник бесперебойного питания Cyberpower UTC650E, который предназначен для защиты от помех и бросков в электросети и поддержания параметров питания в допустимых пределах при кратковременном отключении основного электропитания. Для того чтобы оповестить пользователя о критическом состоянии, на телефон пользователя приходит смс с предупреждением, например, о том, что уровень жидкости в емкости является критическим.

Заключение

Введена новая группа биотехнических систем – биотехнические системы для выращивания растений (БТС-Р). В работе представлена БТС-Р, которая оснащена системой автоматического контроля и управления условиями выращивания растений, включающая системы автоматического полива, освещения, вентиляции, контроля влажности и температуры. Ключевой особенностью БТС-Р является использование лазерной досветки. Разработанная БТС-Р позволяет выращивать как традиционные овощи, так и экзотические растения, ягоды и лекарственные растения, что может быть полезно для людей, которые живут в неблагоприятных климатических условиях и не имеют возможности обеспечивать подходящее место для выращивания.

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

Список литературы

1. История возникновения теплиц. – Текст: электронный. – URL : <https://glass-house.ru/information/stati/istoriya-vozniknoveniya-teplits/> (дата обращения: 18.10.23).
2. История теплиц в России. – Текст: электронный. – URL : <https://teplicy-info.ru/istoriya-teplic-v-rossii/> (дата обращения: 18.10.23).
3. Что такое гидропоника: история и описание метода. – Текст: электронный. – URL : <https://agronovia.ru/chto-takoe-gidroponika/> (дата обращения: 18.10.23).
4. История появления гроубоксов и возможности их использования в домашних условиях. – Текст: электронный / М. Н. Горностаев [и др.] ; науч. рук. Е. Г. Незнамова // Научная сессия ТУСУР–2020 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 13 – 30 мая 2020 г.): в 3 ч. – Томск, 2020. – Ч. 3. – С. 202 – 204.
5. Журавлева, Л. А. Роботизированные мини-теплицы и установки для выращивания агрокультур в домашних условиях / Л. А. Журавлева, А. Алдияб // Научная жизнь. – 2021. – Т. 16, № 5(117). – С. 565 – 574. – doi: 10.35679/1991-9476-2021-16-5-565-574
6. Брагин, А. Ю. Разработка аппаратно-программного комплекса автоматизированного гроубокса / А. Ю. Брагин // Молодежь XXI века: шаг в будущее : мат-лы XVIII региональной науч.-практ. конф. (Благовещенск, 18 мая 2017 г.). – Благовещенск, 2017. – С. 1216 – 1217.
7. Адаптивное управление параметрами микроклимата многофункциональной автоматизированной теплицы с интеллектуальной системой севооборота / М. М. Благовещенская, И. Г. Благовещенский, С. А. Мокрушин, В. Г. Благовещенский // Информатизация и автоматизация в пищевой промышленности : сб. науч. докл. Всерос. науч.-техн. конф. (Москва, 18 мая 2022 г.). – Курск, 2022. – С. 66 – 71.
8. Пат. 2787699 Российская Федерация, МПК A01G 9/14(2006.01), A01G 9/24(2006.01). Комнатная теплица / Журавлева Л. А., Попков И. А.; заявитель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – № 2022109875 ; заявл. 13.04.2022 ; опубли. 11.01.2023. Бюл. № 2. – 4 с.
9. Vernandhes, W. Smart Growbox Design with Temperature and Humidity Monitoring System Via the Internet / W. Vernandhes, N. S. Salahuddin, A. Kowanda // Conference: Seminar TEKNOIN. – 2016. – P. 850 – 859.
10. Example of Grow Box Lighting System Designing / L. Vavra, T. Novak, P. Valicek, S. Vanek, R. Gono // 23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). – Brno, Czech Republic, 24–26 May, 2023. – 2023. doi: 10.1109/EPE58302.2023.10149260
11. Efek Cahaya LED merah dan biru pada pertumbuhan, hasil dan kandungan klorofil tanaman pakcoy (*Brassica chinensis L.*) dalam Growbox / Rosyida, Karno K., Putra F. P., Limantara J. C. // AGROMIX. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 168 – 174. doi: 10.35891/agx.v13i2.3028
12. Chrysanthos, M. Incorporating Artificial Intelligence Technology in Smart Greenhouses: Current State of the Art / M. Chrysanthos // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 13, No. 14. doi: 10.3390/app13010014
13. Биотехнические системы. Теория и проектирование : учеб. пособие / В. М. Ахутин, А. П. Немирко, Н. Н. Першин [и др.]. – Л. : ЛГУ, 1981. – 220 с.
14. Лазерные технологии в сельском хозяйстве : тематический сборник / сост. А. В. Будаговский, И. Б. Ковш. – М. : Техносфера, 2008. – 270 с.
15. Будаговский, А. В. Методика применения когерентной лазерной оптики для повышения эффективности размножения растений in vitro / А. В. Будаговский, Н. В. Соловых, М. Б. Янковская. – Мичуринск-наукоград РФ : Изд-во МичГАУ, 2015. – 71 с.

Biotechnical System for Growing Plants

S. V. Frolov✉, T. A. Frolova, V. O. Lychagina, D. I. Trushin,
I. A. Shatalova, E. S. Shirkina, S. I. Yurlov, O. A. Yarkin

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

Keywords: algorithms; biotechnical system; sensors; laser illumination; mathematical model; microclimate; “smart” greenhouse; control device.

Abstract: A new group of biotechnical systems has been introduced – biotechnical systems for growing plants (BTS-R). The stages of development of BTS-R are presented, which enables to grow plants indoors with minimal time and effort. A key feature of the BTS-R is the use of laser illumination. It is noteworthy that the growing conditions in BTS-R are as close to natural as possible, in contrast to the products offered by supermarkets, grown using hydroponic technology.

References

1. <https://glass-house.ru/information/stati/istoriya-vozniknoveniya-teplits/> (accessed 18 October 2023).
2. <https://tepolicy-info.ru/istoriya-teplic-v-rossii/> (accessed 18 October 2023).
3. <https://agronovia.ru/chto-takoe-gidroponika/> (accessed 18 October 2023).
4. Gornostaev M.N. [et al.]; E.G. Neznamova (Sc. Hands). *Nauchnaya sessiya TUSUR–2020: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Scientific session TUSUR–2020: materials of the International Scientific and Technical Conference of Students, postgraduates and young scientists], Tomsk, May 25-27, 2020: in 3 parts, Tomsk, 2020, part 3, pp. 202-204. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Zhuravleva L.A., Aldiab A. [Robotic mini-greenhouses and installations for growing agricultural crops at home], *Nauchnaya zhizn'*. [Scientific life], 2021, vol. 16, no. 5(117), pp. 565-574, doi 10.35679/1991-9476-2021-16-5-565-574 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Bragin A.Yu. *Molodezh' XXI veka: shag v budushcheye: materialy XVIII regional'noy nauch.-prakt. konf.* [Youth of the XXI century: a step into the future: materials of the XVIII regional scientific and practical conference] (Blagoveshchensk, May 18, 2017), Blagoveshchensk, 2017, pp. 1216-1217. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Blagoveshchenskaya M.M., Blagoveshchensky I.G., Mokrushin S.A., Blagoveshchensky V.G. *Informatizatsiya i avtomatizatsiya v pishchevoy promyshlennosti: sb. nauch. dokl. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Informatization and automation in the food industry: Collection of scientific reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference], (Moscow, May 18, 2022), Kursk, 2022, pp. 66-71. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zhuravleva L.A., Popkov I.A. *Komnatnaya teplitsa* [Room greenhouse], Russian Federation, 2023, Pat. 2787699 (In Russ.)
9. Vernandhes W., Salahuddin N.S., Kowanda A. Smart Growbox Design with Temperature and Humidity Monitoring System Via the Internet, *Conference: Seminar TEKNOIN*, 2016, pp. 850-859.
10. Vavra L., Novak T., Valicek P., Vanek S., Gono R. Example of Grow Box Lighting System Designing, *23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Brno, Czech Republic, 24-26 May, 2023. doi: 10.1109/EPE58302.2023.10149260
11. Rosyida, Karno K., Putra F.P., Limantara, J.C. Efek Cahaya LED merah dan biru pada pertumbuhan, hasil dan kandungan klorofil tanaman pakcoy (*Brassica*

chinensis L.) dalam Growbox, *AGROMIX*, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 168-174. doi: 10.35891/agx.v13i2.3028

12. Chrysanthos M. Incorporating Artificial Intelligence Technology in Smart Greenhouses: Current State of the Art, *Applied Sciences*, 2022, vol. 13, no. 14, doi: 10.3390/app13010014

13. Akhutin V.M., Nemirko A.P., Pershin N.N. [et al.]. *Biotehnicheskiye sistemy. Teoriya i proyektirovaniye : ucheb. posobiye* [Biotechnical systems. Theory and design: Textbook], Leningrad: LSU, 1981, 220 p. (In Russ.)

14. Budagovsky A.V., Kovsh I.B. (Comp.). *Lazernyye tekhnologii v sel'skom khozyaystve : tematicheskiy sbornik* [Laser technologies in agriculture: a thematic collection], Moscow: Technosphere, 2008, 270 p. (In Russ.)

15. Budagovsky A.V., Solovykh N.V., Yankovskaya M.B. *Metodika primeneniya kogerentnoy lazernoy optiki dlya povysheniya effektivnosti razmnozheniya rasteniy in vitro* [Methods of using coherent laser optics to increase the efficiency of plant reproduction in vitro], Michurinsk-Naukograd RF: MichGAU, 2015, 71 p. (In Russ.)

Biotechnisches System für den Anbau von Pflanzen

Zusammenfassung: Eine neue Gruppe von biotechnischen Systemen ist eingeführt – biotechnische Systeme für den Pflanzenanbau (BSPA). Es sind die Entwicklungsschritte des BSPA vorgestellt, das es ermöglicht, Pflanzen in Innenräumen mit minimalem Zeit- und Arbeitsaufwand anzubauen. Ein wesentliches Merkmal von BSPA ist die Verwendung von Laserlicht. Es ist zu bemerken, dass die Wachstumsbedingungen mit Hydroponik-Technologie in dem BSPA im Gegensatz zu den Produkten, die von Supermärkten angeboten werden, so naturnah wie möglich sind.

Système biotechnologique pour la culture des plantes

Résumé: Est introduit un nouveau groupe des systèmes biotechnologiques – les systèmes biotechnologiques pour la culture des plantes (BTC-P). Sont présentées les étapes du développement de BTC-P qui permet de cultiver des plantes à l'intérieur avec un minimum de temps et d'efforts. Une caractéristique clé de BTC-P est l'utilisation de la lumière laser. Il est à noter que les conditions de croissance dans BTC-P sont aussi proches que possible des produits naturels, contrairement aux produits offerts par les supermarchés et cultivés selon la technologie de la culture hydroponique.

Авторы: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Фролова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника»; *Лычагина Виолетта Олеговна* – студент; *Трушин Даниил Игоревич* – студент; *Шаталова Ирина Александровна* – студент; *Ширкина Екатерина Сергеевна* – студент; *Юрлов Станислав Иванович* – студент; *Яркин Олег Андреевич* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ СЫПУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В РОТАЦИОННОМ АППАРАТЕ НА ПЛАТФОРМЕ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Б. Капранова^{1✉}, Д. Д. Бахаева², Д. В. Стенько¹, И. И. Верлока¹

Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика», kapranova_anna@mail.ru (1);

«Информационные системы и технологии» (2),

*ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, Россия*

Ключевые слова: модель; параметры; совмещенные процессы; смешение; сыпучие компоненты; уплотнение; функция распределения; эластичные лопатки.

Аннотация: Выполнено стохастическое моделирование процесса формирования разреженных потоков сыпучих компонентов на этапе ротационного смешивания на платформе кибер-физических систем. Применение энергетического метода для стохастического описания технологической операции смешивания твердых дисперсных сред в рабочем объеме смесителя-уплотнителя с ротационными элементами позволило получить аналитические зависимости между показателями исследуемого процесса и его основными конструктивно-режимными параметрами, а также физико-механическими характеристиками рабочих материалов.

Введение

Современные тенденции развития химических технологий в области переработки сыпучих компонентов отражают необходимость организации соответствующих технологических процессов в условиях отсутствия противоречий между двумя их основными характеристиками – энергоэффективностью и интенсивностью [1]. Растущие потребности пищевой, химической, фармацевтической, строительной и других отраслей народного хозяйства в однородных сыпучих смесях с заданными механическими свойствами и регламентируемыми требованиями к показателю порозности подтверждают актуальность разработки нового оборудования для указанных целей. В данной связи совмещение нескольких технологических операций [2] или, как частный случай, их выполнение в последовательном режиме [3], но в рабочем объеме одного устройства, становится приоритетным направлением проектирования смесительного и уплотнительного оборудования для получения деаэрированной однородной смеси твердых дисперсных материалов с заданным объемным соотношением компонентов. Возникает необходимость учета влияния множества факторов, которые могут негативно сказаться на конечном продукте производства сыпучей смеси, включая эффект сегрегации [4], свойства аэрируемости и слипаемости, соотношения гранулометрического состава компонентов и т.п. [4 – 7]. Одним из способов борьбы с нежелательным при этом

эффектом сегрегации при получении зернистых смесей может быть организация процесса смешивания частиц компонентов в разреженных потоках [8, 9]. Обеспечение проектировщиков соответствующими зависимостями основных показателей смешивания, как одного из процессов в рамках одной технологической цепи, от набора ее конструктивных и режимных параметров предполагает развитие теоретической базы с позиций кибер-физической системы [10].

Цель работы – разработка стохастического описания процесса формирования разреженных потоков на этапе ротационного смешивания при организации дальнейшего совмещения данной операции с уплотнением полученной зернистой смеси на транспортной ленте на кибер-физической платформе. К последней относится формирование набора независимых параметров указанного процесса смешивания.

О сложностях описания процесса смешения сыпучих компонентов

Трудности математического моделирования процесса смешивания частиц зернистых компонентов связаны в первую очередь с многофакторностью решаемых при этом задач [11], что отражается на выборе основного подхода к описанию данной технологической операции и внимании к созданию соответствующей кибер-физической платформы. Несмотря на широкий спектр имеющихся моделей смешивания от детерминированных описаний [5 – 7, 12] до стохастических моделей [1, 13 – 15] и их различных модификаций с элементами комбинирования, в данном случае целесообразно использовать второй для получения информации о распределении частиц по заданной характеристике процесса. Кроме того, вероятностный характер движения частиц в разреженных потоках зернистых материалов определяет конкретный способ математического описания для выбранного подхода моделирования, в частности, предлагается использовать энергетический метод [16], который позволяет учесть основные физико-механические характеристики сыпучих материалов и особенности движения составляющих их частиц.

Применение транспортной ленты в аппаратах для переработки твердых дисперсных сред [17] позволяет успешно совмещать ряд технологических операций в рамках одного рабочего объема [3]. Такая организация обеспечивает непрерывный режим работы проектируемого оборудования, например, при производстве сухих строительных смесей с использованием подвижных жестких перфорированных гребней [18], перемешивания порошков на конвейере неподвижными разделяющими пластинами [19] или даже без перемешивающих органов за счет вибрационных эффектов [20] и т.д.

Один из способов организации разреженных потоков из слоев сыпучих компонентов на подвижной ленте – использование приводных ротационных устройств в виде барабанов с эластичными лопатками [21], симметрично установленных над указанным транспортером под некоторым углом к направлению движения ленты. Вертикальный экран к горизонтальной рабочей поверхности транспортера выполняет роль дополнительного смесительного устройства, а уплотнительный валик с отверстиями для удаления воздуха на другой стороне вертикального экрана функционирует как деаэратор.

Организация процесса образования разреженных потоков зависит от выбора конфигурации эластичных элементов и способа их закрепления на смесительном барабане [8 – 10, 21], например, встречаются: радиальное расположение тонких цилиндрических бил [1], винтовая навивка гибких элементов [9], встречное расположение винтовых навивок для щеточных элементов [8, 10] и т.д. В данном случае поверхности прямоугольных эластичных лопаток закреплены в касательных плоскостях к цилиндрическим поверхностям каждого смесительного барабана, расположенного над транспортной лентой. При этом установка указанных

эластичных лопаток проводится рядами при чередовании направлений их расположения вдоль оси симметрии цилиндрических смесительных барабанов. Такое закрепление эластичных лопаток обеспечивает разбрасывание частиц в различных направлениях смешиваемых компонентов, подаваемых транспортной лентой в зазор указанных барабанов в виде слоев. Стохастическое описание энергетическим методом [16] процесса формирования разреженных потоков сыпучих компонентов над транспортером на этапе ротационного смешивания с помощью одного ряда прямоугольных эластичных лопаток, закрепленных указанным способом, составляет основную задачу настоящего исследования.

Описание движения частицы смешиваемого компонента в момент отрыва от эластичных лопаток

Рассмотрим движение эластичных лопаток длиной l_b , составляющих один ряд бил, которые закреплены указанным выше способом на вращающемся с угловой скоростью ω смесительном барабане. Пусть радиус барабана равен r_b , расстояние между барабаном и горизонтальной транспортной лентой h_0 , число деформированных бил в пределах четверти угла поворота барабана n_b , общее число лопаток одного ряда n . Свяжем полярную систему координат (r, θ) с осью O_1x_1 при отсчете против часовой стрелки полярного угла θ , координаты точки $O_1(x_{O_1}; y_{O_1})$ относительно системы, связанной с центром вращения барабана, имеют вид $O_1(x_{O_1} = r_b \sin \alpha_0; y_{O_1} = r_b \cos \alpha_0)$.

Введем уравнение движения конечных точек эластичных лопастей $M_j, j = 1, n_b$ в полярных координатах в виде спирали Архимеда

$$r_a(\theta) = A + B\theta, \quad (1)$$

где

$$A = h_0 + r_b(1 - \cos \alpha_0); \quad (2)$$

$$B = \left(\left\{ (r_b + l_b)^2 + [r_b(1 + \cos \alpha_0)]^2 \right\}^{1/2} - A \right) / \theta_\delta; \quad (3)$$

$$\theta_\delta = \pi + \arctg \frac{r_b - l_b}{r_b(1 + \cos \alpha_0)}. \quad (4)$$

Положение точки $M_j, j = 1, n_b$, в полярной системе определяется следующим уравнением для произвольной точки M на спирали (1)

$$r_{M_j}(\theta) = r_M(\theta) = r_a(\theta) \cos \frac{3\beta(\theta)}{2} + \frac{\left(\left\{ 2r_a(\theta) \cos \frac{3\beta(\theta)}{2} \right\}^2 - 4[r_a(\theta)]^2 - r_b^2 \right)^{1/2}}{2}, \quad (5)$$

где зависимость для угла, согласно (1) – (5),

$$\beta(\theta) = \arctg \frac{B}{r_a(\theta)}. \quad (6)$$

С учетом $r_a(\theta)$ из уравнения (1) анализируется движение частиц двух сыпучих компонентов ($i = 1, 2$), которые разбрасываются деформируемыми эластичными лопатками из насыпанных друг на друга слоев высотой

$$h_L = \sum_{v=1}^2 h_{Lv} \quad (7)$$

на подвижной ленте. Такие слои заполняют зазор между смесительным барабаном и указанным транспортером.

Пусть средний диаметр сферических частиц, плотность которых ρ_{Ti} , с учетом числа фракций n_v определяется выражением

$$d_{Ti} = n_v^{-1} \sum_{v=1}^{n_v} d_{Tiv} . \quad (8)$$

Скорость частицы $V_{r\theta i}$ для каждого компонента ($i = 1, 2$) при описанном движении в момент отрыва от конца деформированной эластичной лопатки в полярной системе координат задается выражением

$$V_{r\theta i}(r_M(\theta), \theta) = \frac{\omega r_M(\theta)}{\cos \left\{ \arctg \frac{B}{r_a(\theta)} \right\}} . \quad (9)$$

Энергия частицы E_i при разбрасывании упругой эластичной лопаткой определяется тремя составляющими (кинетическими энергиями поступательного движения частицы вместе с центром масс; вращательного движения относительно него и энергией упругого взаимодействия частицы с эластичной лопаткой) согласно (1), (5), (9) с учетом (2) – (4), (6) – (8)

$$E_i = a_i d_{Ti} \omega^2 \left\{ d_{Ti}^2 + 10 p_3 \frac{(c_0 + c_1 \theta)^4}{c_0^2 [(p_0 + p_1 \theta)^2 + p_2^2]} \right\} \frac{(c_0 + c_1 \theta)^4}{c_0^2 [(p_0 + p_1 \theta)^2 + p_2^2]} + \frac{k_u \theta^2}{2} , \quad (10)$$

где

$$c_1 = \left(\frac{3k_2}{2A^3} + \frac{k_0 k_4 B}{A} + \frac{A^3 B [2k_4 (k_0^2 - A^2) + k_3]}{8k_1} \right) / k_4 ; \quad (11)$$

$$a_i = \frac{\pi \rho_{Ti}}{12} ; \quad c_0 = k_0 + k_1 ; \quad p_0 = \cos \left(\frac{1}{2} \arctg \frac{B}{A} \right) ; \quad (12)$$

$$p_1 = \frac{B^2}{2k_4} \sin \left(\frac{1}{2} \arctg \frac{B}{A} \right) ; \quad p_2 = [p_0 (1 - p_0)]^{1/2} ; \quad (13)$$

$$p_3 = (p_0^2 + p_2^2)^2 ; \quad k_0 = A \cos \left(\frac{3}{2} \arctg \frac{B}{A} \right) ; \quad k_4 = A^2 + B^2 ; \quad (14)$$

$$k_2 = B^2 \sin \left(\frac{3}{2} \arctg \frac{B}{A} \right) ; \quad k_0 = \frac{3}{2} AB \sin \left(3 \arctg \frac{B}{A} \right) . \quad (15)$$

Моделирование функций распределений частиц сыпучих компонентов энергетическим методом

Для дальнейшего моделирования процесса формирования разреженных потоков двух сыпучих материалов, смешиваемых ротационным устройством, предлагается в рамках стохастического подхода использовать энергетический метод [16], который позволяет учесть форму энергии стохастического движения частиц в виде (10). Рассматривая указанную технологическую операцию как случайный процесс однородного, непрерывного, стационарного, гауссовского типа, применим формализм марковского процесса для состояний макросистемы частиц каждого компонента без притока энергии извне. Тогда в отсутствии макрофлуктуаций данных макросистем, связанных с соударениями частиц, считаем, что в образующихся потоках является незначительным перекрестное движение одного потока в другом, смещение частиц обоих сформированных потоков является сонаправленным. В указанном приближении справедлив формализм Орнштейна–Уленбека [16] с решением уравнения Фоккера–Планка в энергетическом представлении для стационарного случая относительно функции распределения числа частиц в следующей форме:

$$\varphi_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{E_{0i}}\right), \quad (16)$$

где константа нормировки A_i находится из условия

$$\int_{\Psi_i} \varphi_i d\Psi_i = 1 \quad (17)$$

при введении элемента фазового объема:

$$d\Psi_i = dv_{xi} dv_{yi} \equiv dv_x dv_y \quad \text{или} \quad d\Psi = dv_x dv_y = -\omega^2 r dr d\theta \quad (18)$$

в приближении одновременного взаимодействия упругого эластичного элемента с частицами каждого компонента.

Вследствие (16), (17) убывание числа частиц dN_i компонента $i = 1, 2$ в элементарном объеме $d\Psi$ из (18) задается формулой [16]

$$dN_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{E_{0i}}\right) d\Psi. \quad (19)$$

В выражениях (16), (19) содержится энергетический параметр E_{0i} , физический смысл которого определяется энергией стохастического движения частиц в момент начала стохастизации состояний макросистемы ($i = 1, 2$). Выражения (16) – (19) дают возможность определить искомое выражение для дифференциальной функции распределения числа частиц компонента $i = 1, 2$ по выделенному признаку изучаемого процесса, например, по углу разбрасывания, совпадающему в данном случае с полярной угловой координатой θ . В частности, при этом выполняется

$$f_i(\theta) = \frac{1}{N_i} \frac{dN_i}{d\theta}. \quad (20)$$

Тогда с учетом выражений (10) – (15), (17), (19), (20) получим искомую зависимость

$$f_i(\theta) = Q_i \left([H_1(\theta)]^2 + p_2^2 \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{k_u \theta^2}{E_{0i}} \right) \left[\operatorname{erf} \left(\lambda_{2i} [H_2(\theta)]^2 \left([H_1(\theta)]^2 + p_2^2 \right)^{-1/2} \right) - \operatorname{erf} \left(\lambda_{2i} \left([H_1(\theta)]^2 + p_2^2 \right)^{-1/2} \right) \right] / \left(\exp \left[-10 \left(\lambda_{1i} + \frac{k_u \theta^2}{E_{0i}} \right) \right] - \exp(-\lambda_{1i}) \right), \quad (21)$$

где

$$Q_i = \frac{c_0}{16c_1} \sqrt{\frac{\pi k_u}{E_{0i} g_{1i} g_{2i}}}; \quad (22)$$

$$H_1(\theta) = p_0 + p_1 \theta; \quad H_2(\theta) = c_0 + c_1 \theta; \quad (23)$$

$$\lambda_{2i} = \frac{3}{2c_0^2} \sqrt{\frac{k_u g_{1i} g_{2i}}{E_{0i}}}; \quad \lambda_{1i} = \frac{k_u g_{1i} g_{2i}}{E_{0i} (2p_0^2 + p_2^2)}. \quad (24)$$

Значение параметра E_{0i} определяется из уравнения баланса для суммарных энергий частиц макросистемы ($i = 1, 2$): при захвате частиц каждого компонента концами гибких элементов из зазора барабан-лента E_{Ci} и при разбрасывании данных частиц указанными билами E_{Di} в области изменения полярной угловой координаты $\theta \in [\theta_{0i}; \theta_{1i}]$. Тогда с учетом эффекта смешивания компонентов справедливо

$$\sum_{i=1}^2 E_{Ci} = \sum_{i=1}^2 E_{Di}. \quad (25)$$

В дальнейшем изложении принимается ряд допущений. Пусть при учете различной толщины слоев сыпучих материалов из (7) на транспортной ленте выполняется приближение $h_{Li} = h_L/2$; характер движения конечных точек эластичных лопастей M_j , $j = 1, n_b$ в полярных координатах определяется выражением (5); усредненная скорость частицы $V_{r\theta i}$ массой m_i для каждого сыпучего компонента ($i = 1, 2$) по полярной угловой координате в области $\theta \in [0; \alpha_0]$ подчиняется выражению (9).

Следовательно, уравнение (25) относительно E_{0i} , согласно (17), (19), принимает вид

$$\sum_{i=1}^2 N_i m_i \left\{ \frac{h_0^2}{2} + \alpha_0^{-1} \int_0^{\alpha_0} \frac{(r_M(\theta))^4 d\theta}{[H_1(\theta)]^2 + p_2^2} \right\} + \sum_{i=1}^2 A_i \int_{\theta_{0i}}^{\theta_{1i}} d\theta \int_{r_{Li}}^{r_M(\theta)} E_i \exp \left(- \frac{E_i}{E_{0i}} \right) r dr = 0, \quad (26)$$

где значения радиальных координат $r_{L1} = h_0 + r_b(1 - \cos \alpha_0)$; $r_{L2} = r_{L1} - h_L/2$ соответствуют значениям для угла θ_{1i} при $i = 1, 2$.

Обсуждение результатов модели ротационного смешения сыпучих компонентов

Пусть выполняется технологическая операция смешивания природного песка ГОСТ 8736–2014 при $i = 1$ и манной крупы ГОСТ 7022–2019 при $i = 2$. Значения физико-механических характеристик указанных сыпучих материалов следующие:

истинная плотность ρ_{Ti} , 10^3 мг/м³, природного песка и манной крупы 1,525 и 1,440 соответственно; усредненный диаметр частиц d_{Ti} , 10^{-4} м, – 1,500 и 4,000 соответственно [22, 23]. Выбор данных сыпучих материалов связан с необходимостью замены некоторых токсичных составов модельными смесями с аналогичными физико-механическими свойствами, в частности, при условии сравнимых значений плотностей веществ составляющих компонентов. Приведем основные значения параметров сформированной кибер-физической платформы изучаемого процесса (табл. 1).

Согласно выполненному стохастическому моделированию изучаемого процесса ротационного смешивания, с помощью выражений (20), (21) построены семейства кривых для зависимостей дифференциальных функции распределения числа частиц каждого компонента $f_1(\theta)$ и $f_2(\theta)$ по полярной угловой координате θ соответственно на рис. 1, а, б. Значения энергетических параметров E_{0i} вычислены согласно (26).

Таблица 1

Значения и пределы изменения параметров ротационного смешения сыпучих компонентов при работе смесителя-уплотнителя	
Параметр	Значение
<i>Конструктивные параметры</i>	
Радиус барабана r_b , 10^{-2} м	3,00
Длина эластичной лопатки l_b , 10^{-2} м	4,50
<i>Режимные параметры</i>	
Высота зазора h_0 , 10^{-2} м	3,00
Высота слоев компонентов h_L , 10^{-2} м	
Угловая скорость вращения ω , с ⁻¹	41,0...53,0

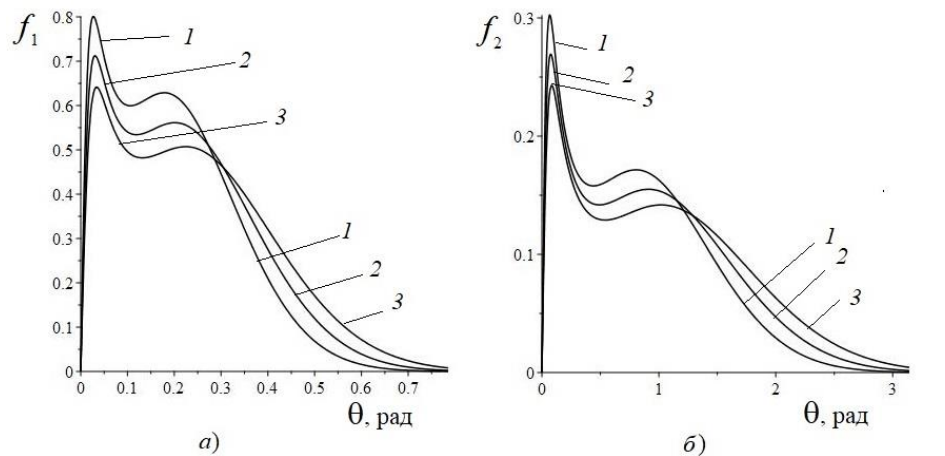


Рис. 1. Зависимости дифференциальных функций распределения числа частиц природного песка (а) и манной крупы (б) по полярной угловой координате θ при ω , с⁻¹: 1 – 41,9; 2 – 47,1; 3 – 52,4

Анализ полученных результатов показывает, что при начальных углах поворота эластичных лопаток происходит основное сбрасывание сыпучих материалов (см. характерные первые всплески на кривых 1 – 3, рис. 1, *а, б*), в частности, более половины компонента $i = 1$, когда гибкие элементы максимально деформированы после выхода из зазора барабан-лента. Заметим, что для обоих компонентов сохраняется тенденция к дальнейшему удалению оставшихся частиц при восстановлении формы эластичной лопатки (см. вторые всплески на рис. 1, *а, б*).

Кроме того, дисперсия для компонента $i = 2$ более выражена, чем для компонента $i = 1$, например, дисперсионный диапазон длиннее для манной крупы примерно в 1,5 раза, чем для песка. Данный факт свидетельствует, что при заданных конструктивных и режимных параметрах частицы компонента $i = 2$ рассеиваются с большей скоростью, чем компонент $i = 1$, что объясняется физико-механическими особенностями рассматриваемых сыпучих материалов.

Частицы природного песка более мелкие ($d_{T2}/d_{T1} = 2,7$), но более тяжелые ($\rho_{T2}/\rho_{T1} = 0,94$), чем частицы манки, вследствие чего отскакивают под меньшим углом от поверхностей эластичных лопаток. Однако простое изменение угловой скорости вращения смесительного барабана в выбранном диапазоне $41,0 \dots 53,0 \text{ с}^{-1}$ не меняет данную картину, что подтверждает выводы, сделанные в работах [8 – 10], о необходимости дополнительного исследования других факторов, существенно влияющих на процесс формирования разреженных потоков ротационным способом. Например, как было показано в работах [8 – 10], к таким факторам следует отнести степень деформирования гибких элементов в зазорах с барабаном, которая характеризуется отношением длины бил к высоте зазора. Кроме того, рассмотрен результат работы только одного ряда эластичных лопастей.

Вышесказанные замечания о полученных результатах моделирования приводят к необходимости расширения набора исследуемых конструктивных параметров при формировании кибер-физической платформы для разработки инженерного метода расчета проектируемого смесителя-уплотнителя. Выявленная характерная тенденция разбрасывания основного числа частиц при малых углах поворота смесительного барабана для обоих компонентов является основой для получения условия эффективного смешивания сыпучих компонентов. При этом требуется такая настройка диапазонов множества параметров процесса, влияющих на формирование кибер-физической системы, чтобы обеспечить условие сближения экстремальных угловых значений для полярной координаты θ смешиваемых компонентов. Например, указанное сближение фактически наблюдается ($\theta < 0,19$ рад) при сравнении первых всплесков на кривых 3 (см. рис. 1, *а и б*), построенных при одинаковом максимальном значении угловой скорости барабана из выбранного диапазона изменения параметра ω .

Заключение

Таким образом, выполненное стохастическое моделирование процесса формирования разреженных потоков сыпучих компонентов на этапе ротационного смешивания с помощью одного ряда прямоугольных эластичных лопаток, закрепленных в касательных плоскостях к цилиндрической поверхности смесительного барабана, расположенного над транспортной лентой, показало возможность применения энергетического метода. Полученные при этом аналитические зависимости для дифференциальных функций распределения числа частиц каждого компонента по полярной угловой координате позволяют:

- выявить необходимые для анализа основные факторы влияния на эффективность процесса смешивания;
- расширить параметры изучаемого процесса, участвующие в формировании платформы его кибер-физической системы;
- спрогнозировать поведение сыпучих компонентов при их ротационном смешивании для создания условий эффективного смешивания при анализе достижимости критерия сближения экстремальных угловых значений полярной координаты для смешиваемых сыпучих компонентов;
- с учетом перечисленных выше фактов подтвердить целесообразность применения на транспортной ленте смесительного устройства в виде барабана с эластичными лопатками, закрепленными указанным способом с помощью оценки критерия качества получаемой сыпучей смеси, например, вычисляя коэффициент ее неоднородности.

Список литературы

1. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука, 1985. – 440 с.
2. Капранова, А. Б. Стохастическая модель совмещенных или последовательных процессов деаэрации и смешивания сыпучих сред на примере работы центробежного устройства / А. Б. Капранова // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53, № 2. – С. 229 – 240. doi: 10.1134/S004035711901007X
3. Капранова, А. Б. Исследование порозности порошков при компактировании давлением в смесителях-деаэраторах / А. Б. Капранова, А. И. Зайцев, И. О. Кузьмин // Теоретические основы химической технологии. – 2015. – Т. 49, № 4. – С. 456 – 466. doi: 10.7868/S0040357115040065
4. Bauman, I. Mixing of Solids in Different Mixing Devices / I. Bauman, D. Curic, M. Boban // Sadhana. – 2008. – Vol. 33, No. 6. – P. 721 – 731. doi: 10.1007/s12046-008-0030-5
5. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
6. Ким, В. С. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков. – М. : Химия, 1988. – 240 с.
7. Satomo, I. Solids Mixing / I. Satomo // Puranto Kogaku. – 1972. – Vol. 10, No. 5. – P. 63 – 69.
8. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707 – 721. doi: 10.1134/S0040357118050044
9. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 3 – 9.
10. Kapranova, A. B. About Preparation of the Analytical Platform for Creation of a Cyber-Physical System of Industrial Mixture of Loose Components / A. B. Kapranova, I. I. Verloka, D. D. Bahaeva // In monograph: Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control / eds. A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. – Springer, Cham, 2020. – V. 259. – P. 81 – 91. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_7

11. Shaul, S. Generalized Flow Regime Diagram of Fluidized Beds Based on the Height to Bed Diameter Ratio / S. Shaul, E. Rabinovich, H. Kalman // *Powder Technology*. – 2012. – Vol. 228. – P. 264 – 271. doi: 10.1016/j.powtec.2012.05.029
12. Lai, F. S. The Convective Mixing Process and Striated Mixture / F. S. Lai, L. T. Fan, Y. Akao // *Journal of Powder and Bulk Solids Technology*. – 1978. – Vol. 2. – P. 38.
13. Леончик, Б. И. Измерения в дисперсных потоках / Б. И. Леончик, В. П. Маякин. – М. : Энергия, 1971. – 248 с.
14. Dehling, H. G. Stochastic Modeling in Process Technology / H. G. Dehling, T. Gottschalk, A. C. Hoffmann. – London : Elsevier Science, 2007. – 279 p.
15. Almendros-Ibanez, J. A. A new model for ejected particle velocity from erupting bubbles in 2-D fluidized beds / J. A. Almendros-Ibanez, C. Sobrino, M. de Vega, D. Santana // *Chemical Engineering Science*. – 2016. – Vol. 61, No. 18. – P. 5981 – 5990. doi: 10.1016/j.ces.2006.05.008
16. Климонтович, Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.
17. Kaye, B. H. Mixing of Powders / B. H. Kaye // In: Fayed M. E., Otten L. (Eds.) *Handbook of Powder Science & Technology*. – Boston, MA : Springer, 1997. – P. 568 – 585. doi: 10.1007/978-1-4615-6373-011
18. Пат. 2325993 Российская Федерация, МПК В 28 С 5/36. Устройство для приготовления сухой строительной смеси / В. И. Трофимов, В. Е. Лебедев ; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет. – № 2006140197/03 ; заявл. 14.11.2006 ; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16. – 5 с.
19. Pat. 4591275 USA, IPC B 28 C 5/36. Apparatus for Mixing Pulverulent Material on a Conveyor Belt / Donald R. Garthus. – Publ. 27.05.1986.
20. Пат. 2242273 Российская Федерация, МПК В 01 F 3/18. Способ приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации / В. Ф. Першин, С. В. Барышникова, Д. К. Каляпин, А. А. Осипов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2003113033/15, заявл. 05.05.2003; опубл. 20.12.04, Бюл. № 35.
21. Пат. 2624698 Российская Федерация, В01F3/18. Агрегат для смешения и уплотнения сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, А. А. Ватагин, М. Е. Борисовский, М. Н. Романова, Н. В. Бадаева, И. С. Шеронина ; заявитель и патентообладатель ООО «МилИнвест». – № 2016143292, заявл. 02.11.2016; опубл. 05.07.2017, Бюл. № 19. – 7 с.
22. Моделирование процесса ротационного смешивания сыпучих компонентов на платформе кибер-физических систем / А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева, Д. В. Стенько, И. И. Верлока // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33 : сб. трудов 33-й Междунар. науч. конф. в 12 т. (г. Казань) / под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб., 2020. – Т. 4. – С. 20 – 26.*
23. A Model of Rotational Mixing of Loose Environment on the Platform of Cyber-Physical Systems / A. B. Kapranova, D. D. Bahaeva, D. V. Stenko, I. I. Verloka // In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds.). *Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham, 2021. – Vol. 342. – P. 167 – 178. doi: 10.1007/978-3-030-66081-9_13

Modeling of Mixing Bulk Components in a Rotary Device on a Cyber-Physical Systems Platform

A. B. Kapranova^{1✉}, D. D. Bakhaeva², D. V. Stenko¹, I. I. Verloka¹

Departments: “Theoretical and Applied Mechanics”, kapranova_anna@mail.ru (1);
“Information Systems and Technologies” (2), Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

Keywords: model; options; combined processes; mixing; bulk components; compaction; distribution function; elastic shoulder blades.

Abstract: Stochastic modeling of the process of formation of rarefied flows of bulk components at the stage of rotational mixing on the platform of cyber-physical systems was carried out. The use of the energy method for a stochastic description of the technological operation of mixing solid dispersed media in the working volume of a mixer-compactor with rotary elements made it possible to obtain analytical relationships between the indicators of the process under study and its main design and operating parameters, as well as the physical and mechanical characteristics of the working materials.

References

1. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu. *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Protssy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials], Moscow: Nauka, 1985, 440 p. (In Russ.)
2. Kapranova A.B. [Stochastic model of combined or sequential processes of deaeration and mixing of bulk media on the example of the operation of a centrifugal device], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2019, vol. 53, no. 2, pp. 229-240. doi: 10.1134/S004057951901007X (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kapranova A.B., Zaytsev A.I., Kuz'min I.O. [Investigation of the porosity of powders during compaction by pressure in mixers-deaerators], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2015, vol. 49, no. 4, pp. 456-466. doi: 10.7868/S0040357115040065 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Bauman I., Curic, D., Boban, M. Mixing of solids in different mixing devices, *Sadhana*, 2008, vol. 33, no. 6, pp. 721-731. doi: 10.1007/s12046-008-0030-5
5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
6. Kim V.S., Skachkov V.V. *Dispergirovanie i smeshenie v protsessakh proizvodstva i pererabotki plastmass* [Dispersion and mixing in plastics manufacturing and processing], Moscow: Khimiya, 1988, 240 p. (In Russ.)
7. Satomo, I. Solids mixing, *Puranto Kogaku*, 1972, vol. 10, no. 5, pp. 63-69.
8. Kapranova A.B., Verloka I.I. [Studying the Porosity of Powders under Pressure Compaction in Deaeration Mixers], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2018, vol. 52, no. 6, pp. 707-721. doi: 10.1134/S0040357118050044 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Kapranova A. B., Bakin M. N., Verloka I. I. Simulation of the Quality Criterion of a Mixture in a Drum-Belt Apparatu, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, no. 5-6, pp. 287-297. doi: 10.1007/s10556-018-0477-0
10. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bahaeva D.D. [About Preparation of the Analytical Platform for Creation of a Cyber-Physical System of Industrial Mixture of Loose Components], In *monograph*: Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. (Eds.) *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Model-ing. Studies in Systems, Decision and Control*, Cham: Springer, 2020, vol. 259. pp. 81-91. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_7
11. Shaul S., Rabinovich E., Kalman H. Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio, *Powder Technology*, 2012, vol. 228, pp. 264-271.
12. Lai F.S., Fan L.T., Akao Y. The convective mixing process and striated mixture, *Journal of Powder and Bulk Solids Technology*, 1978, vol. 2, pp. 38.
13. Leonchik B.I., Mayakin V.P. *Izmereniya v dispersnykh potokakh* [Dispersed flow measurements], Moscow: Energiya, 1971, 248 p. (In Russ.).
14. Dehling H.G., Gottschalk T., Hoffmann A.C. *Stochastic Modeling in Process Technology*. London: Elsevier Science, 2007, 279 p.
15. Almendros-Ibanez J.A., Sobrino C., de Vega M., Santana D. A New Model for Ejected Particle Velocity from Erupting Bubbles in 2-D Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science*, 2016, vol. 61, pp. 5981-5990.
16. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoye dvizheniye i struktura khaosa: Novyy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh sistem* [Turbulent motion and the structure of chaos: A new approach to the statistical theory of open systems], Moscow: LENAND, 2014, 328 p. (In Russ.)
17. Kaye B.H. Mixing of Powders. In: Fayed M.E., Otten L. (Eds.). *Handbook of Powder Science & Technology*, Boston, MA: Springer, 1997. doi: 10.1007/978-1-4615-6373-011
18. Trofimov V.I., Lebedev V.E. *Ustroystvo dlya prigotovleniya sukhoy stroitel'noy smesi* [Device for preparation of dry construction mixture], Russian Federation, 2010, Pat. 2325993. (In Russ.)
19. Garthus Donald R. Apparatus for mixing pulverulent material on a conveyor belt, USA, 1986, Pat. 4591275.
20. Pershin V.F., Baryshnikova S.V., Kalyapin D.K., Osipov A.A. *Sposob prigotovleniya mnogokomponentnykh smesey i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method for preparing multicomponent mixtures and device for its implementation], Russian Federation, 2004, Pat 2242273 (In Russ.)
21. Lebedev A.E., Vatagin A.A., Borisovskiy M.E., Romanova M.N., Badaeva N.V., Sheronina I.S. *Agregat dlya smesheniya i uplotneniya sypuchikh materialov* [Bulk Material Mixing and Compaction Machine], Russian Federation, 2017, Pat. 2624698. (In Russ.).
22. Kapranova A.B., Bahaeva D.D., Stenko D.V., Verloka I.I.; Bol'shakov A.A. (Ed.). *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-33, sb. trudov 33-y Mezhdunar. nauch. konf. v 12 t. (Kazan)* [Mathematical methods in engineering and technology - MMTT-33, Sat. Proceedings of the 33rd Intern. scientific conf. in 12 volumes. (Kazan)], St. Petersburg, 2020. vol. 4. pp. 20-26. (In Russ.)
23. Kapranova A.B., Bahaeva D.D., Stenko D.V., Verloka I.I. A Model of Rotational Mixing of Loose Environment on the Platform of Cyber-Physical Systems. In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (Eds.). *Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 342, pp. 167-178. Cham: Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-66081-9_13

Modellierung des Mischens von Schüttgütern im Rotationsgerät auf der Plattform für cyber-physische Systeme

Zusammenfassung: Es ist eine stochastische Modellierung des Prozesses der Bildung verdünnter Ströme von MassenkompONENTEN im Stadium der Rotationsmischung auf der Plattform cyber-physikalischer Systeme durchgeführt. Die Verwendung der Energiemethode zur stochastischen Beschreibung des technologischen Vorgangs des Mischens fester dispergierter Medien im Arbeitsvolumen des Dichtungsmischers mit rotierenden Elementen ermöglichte es, analytische Beziehungen zwischen den Indikatoren des untersuchten Prozesses und seinem Hauptdesign und Betriebsparameter zu erhalten sowie den physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Arbeitsstoffe.

Simulation du mélange des composants en vrac dans un appareil rotatif sur une plate-forme des systèmes cyber-physiques

Résumé: Est réalisée une simulation stochastique du processus de la formation des flux clairsemés des composants en vrac au cours de l'étape de mélange rotatif sur la plate-forme de systèmes cyber-physiques. L'utilisation de la méthode énergétique pour la description stochastique de l'opération technologique du mélange de milieux solides dispersés dans le volume de travail du mélangeur-compacteur avec des éléments rotatifs a permis d'obtenir des relations analytiques entre les indicateurs du processus étudié et ses principaux paramètres de structure et de régime, ainsi que les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux de travail.

Авторы: *Капанова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», *Бахаева Дарья Дмитриевна* – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», *Стенько Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», *Верлока Иван Игоревич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСФОЛИАЦИИ ГРАФИТА В СТЕРЖНЕВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

С. С. Ю. Альдавуд¹, А. А. Баранов², В. Ф. Першин^{1✉}

*Кафедры: «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
pershin.home@mail.ru (1); «Техника и технологии производства нанопродуктов»(2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: графит; малослойный графен; многослойный графен; сдвиговая эксфолиация; суспензия.

Аннотация: Рассмотрены особенности процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице и установлено, что между мелющими стержнями и внутренней поверхностью барабана образуется зазор из измельчаемых частиц, причем величина данного зазора в процессе эксфолиации уменьшается. Предложен механизм процесса эксфолиации, в соответствии с которым расслоение частиц происходит после их прохождения через данный зазор. Исходный порошок графита представлен как совокупность фракций с одинаковыми диапазонами размеров частиц. Для моделирования процесса использован математический аппарат случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени. Приведен пример использования модели при определении гранулометрического состава в процессе эксфолиации.

Введение

Графен благодаря своим уникальным свойствам все шире используется в различных отраслях промышленности. В англоязычной литературе часто используются термины *few-layer graphene* (малослойный графен) и *multilayer graphene* (многослойный графен). В соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016 [1] указанные термины можно объединить одним – *нанопластины графита*. Нанопластина – нанообъект, линейные размеры которого по одному измерению находятся в нанодиапазоне, а размеры по двум другим измерениям значительно больше [2]. Основные способы производства графена – механический метод эксфолиации [3], отгонка жидкой фазы [4]; окислительно-восстановительный метод [5]; химическое осаждение из газовой фазы [6]. Такое разнообразие технологий объясняется тем, что в зависимости от применения нанопластин, к ним предъявляются определенные требования по размерам, числу графеновых слоев, электропроводности и т.д. Например, при модифицировании бетона необходимы нанопластины, состоящие из пяти-семи графеновых слоев, а при модифицировании пластичных смазок используются нанопластины, содержащие 20 – 25 графеновых слоев. При создании электронных устройств в основном используется одно- или двух-слойный графен с минимальным числом дефектов. 2D-графен является фундаментальным элементом всех других аллотропов углерода, включая 0-мерные (0D) фуллерены, 1-мерные (1D) углеродные нанотрубки (УНТ) и трехмерный (3D) графит. Все эти аллотропы можно получить, модифицируя графен [7]. Кроме того, графен легкий, твердый, прочный и демонстрирует исключительные

электро- и теплопроводности, но при этом самый тонкий и прочный среди наноматериалов.

Несмотря на то что УНТ и графен почти одинаковы по своим свойствам, УНТ имеют некоторые существенные недостатки с точки зрения токсичности и стоимости производства. Если УНТ долгое время используются в медицине, они могут вызвать гибель клеток человеческого тела и вызвать окислительный стресс, злокачественную трансформацию, разрушение ДНК, воспаление легких, рубцевание кожи и других органов [8]. Кроме того, разработка и синтез УНТ с другими органическими и неорганическими веществами являются трудоемкими процессами. В отличие от УНТ, графен не содержит металлических примесей, что делает его более биосовместимым материалом, чем УНТ [9]. Более того, графен можно синтезировать из графита, который дешевле, чем сырье (источники углерода, такие как метан) УНТ.

Нанопластины графита широко используются при модифицировании полимерных композитных материалов. Эти композиты используются при создании сенсоров и биосенсоров [10], суперконденсаторов [11], систем для доставки лекарств [12].

Как отмечалось выше, разработано много способов получения нанопластин графита, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Одним из наиболее перспективных является способ получения нанопластин графита жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита. Это объясняется тем, что данный способ экологически безопасен, прост и легко масштабируется для промышленного применения. Одна из технологических схем промышленного производства нанопластин графита и модифицирования пластичных смазок рассмотрена в работе [13]. Часть данной схемы может быть использована для производства нанопластин, имеющих определенный диапазон размеров, для модифицирования функциональных и конструкционных материалов в целях улучшения их эксплуатационных характеристик. В этом случае схема содержит три основных узла: механоактивацию и частичную эксфолиацию графита в стержневой барабанной мельнице; окончательную эксфолиацию в каскаде роторных аппаратов с подвижными лопастями; классификацию нанопластин по размерам. Для расчета основных параметров указанных узлов необходимо иметь математические модели реализуемых в них процессов. Поскольку эффективность окончательной эксфолиации графита в роторных аппаратах значительно зависит от размеров нанопластин после обработки в стержневой барабанной мельнице, прежде всего, необходимо разработать математическую модель данного процесса.

Объект моделирования

Объект моделирования – процесс жидкофазной сдвиговой эксфолиации частиц графита в стержневой барабанной мельнице [14]. Рабочий орган мельницы состоит из нечетного числа барабанов, расположенных соосно. Барабаны соединены между собой и вращаются приводом с одинаковой угловой скоростью. Порошок кристаллического графита и диспергирующей жидкости в определенном соотношении дозаторами подается во внутренний барабан. При вращении барабанов частицы графита смешиваются с диспергирующей жидкостью, расслаиваются, и обработанная смесь через узел выгрузки выходит из мельницы. Внутри каждого барабана расположены стержни, соединенные между собой гибкими связями. Стержни постоянно скользят по внутренним поверхностям барабанов, и из частицы, которая попадает в зону контакта стержней с барабаном, за счет возникающих в ней касательных напряжений образуются две частицы, то есть реализуется процесс эксфолиации.

Моделирование процесса

Ранее предложен механизм процесса расслоения одной частицы на две [15], в котором предполагалась равная вероятность расслоения одной частицы графита, содержащей N слоев, на две с числом графеновых слоев от 1 до $N - 1$. Результаты экспериментальных исследований показали, что под стержнями всегда находятся частицы, которые образуют зазор Δ между стержнями и внутренней поверхностью вращающегося барабана. Данный факт вносит существенные изменения в механизм процесса расслоения [15], поскольку часть частиц, толщина которых меньше величины зазора Δ , в процессе эксфолиации не участвует. Таким образом, в результате эксфолиации из частицы с толщиной h образуются две частицы с толщинами Δ и $h - \Delta$. Установлено также, что в процессе эксфолиации величина указанного зазора уменьшается, по всей видимости, в результате снижения средней толщины частиц. Для моделирования процесса в работе [15] использовался математический аппарат случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени. Учитывая, что число графеновых слоев в частицах графита составляет несколько тысяч, размерность вектора состояния системы, а, следовательно, и размерность матрицы переходных вероятностей были огромны, что затрудняло расчеты по данной модели. Результаты экспериментальных исследований показали, что окончательная эксфолиация в роторных аппаратах с подвижными лопастями наиболее интенсивно реализуется, когда толщина частиц в исходной суспензии менее 100 нм. Исходя из этого предлагается новый механизм эксфолиации графита в стержневой мельнице при следующих допущениях: гранулометрический состав исходного материала, поступающего в стержневую мельницу, состоит из фракций, каждая из которых содержит частицы с толщиной, кратной 100 нм; зазор Δ между стержнями и внутренней поверхностью барабана зависит от гранулометрического состава суспензии в текущий момент; в результате расслоения одной частицы с толщиной h_i образуются две частицы с толщинами Δ и $h_i - \Delta$. Схема механизма эксфолиации показана на рис. 1.

Реализацию предлагаемой модели рассмотрим на примере системы, состоящей из 10 фракций. Для формирования вектора начального состояния использовался следующий прием. Сделано предположение, что исходное распределение частиц по числу графеновых слоев подчиняется нормальному распределению, то есть математически описывается функцией плотности нормального распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1)$$

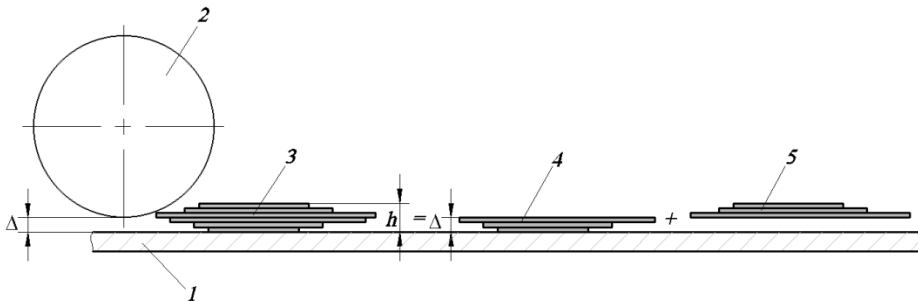


Рис. 1. Схема механизма эксфолиации:

1 – обечайка барабана; 2 – стержень; 3 – исходная частица; 4, 5 – часть частицы, которая соответственно прошла и не прошла через зазор

Интервал дисперсности от 0 до $x_{\max} = 4000$ слоев разбивался на $n = 10$ фракций с диапазоном чисел слоев во фракции $h = 400$ ($[0...400]$, $[400...800]$, ..., $[3600...4000]$). Среднее значение из каждой фракции 200, 600, ..., 3800 подставлялось в функцию плотности нормального распределения с параметрами: среднее значение числа слоев $\mu = 3200$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma = 200$. Полученное значение $f(x)$ умножалось на величину интервала h . Таким образом, получалась доля частиц заданной фракции в соответствии с принятым нормальным распределением. Вектор начального состояния системы имеет вид

$$S[0] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,008863696822 \ 0,4839414488 \ 0,4983311578 \ 0,008863696822 \ 0]. \quad (2)$$

Обычно систему представляют в виде цепи Маркова, которая состоит из ячеек. Для рассматриваемого примера цепь Маркова показана на рис. 2. Частицы со средней толщиной находятся в девяти ячейках. Предположим, что зазор между стержнем и обечайкой барабана равен средней толщине частиц, находящихся в ячейке 8. Частицы, которые находятся в ячейках с первой по восьмую, не будут участвовать в процессе эксфолиации, поэтому для них элементы матрицы переходных вероятностей $p(i, i) = 1$, а остальные элементы равны нулю. Из каждой частицы ячейки 9, образуются две частицы, одна из которых перейдет в ячейку 8, а вторая в ячейку 1. Частицы из ячейки 10 переходят в ячейки 2 и 8.

Состояние системы $S[1]$ после первого перехода находится в результате перемножения вектора начального состояния $S[0]$ на матрицу переходных состояний $P[1]$, которая представлена выражением (3):

$$P[1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0014534883 \ 72 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4985465116 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0113960114 \ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4886039886 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0364864864 \ 9 & 0 & 0 & 0 & 0,4635135135 & 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$S[1] = [0,7243185433e^{-3} \ 0,1010107900e^{-3} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,8863696822e^{-2} \ 0,7367135467 \ 0,2491655789 \ 0,4431848411e^{-2} \ 0]. \quad (4)$$

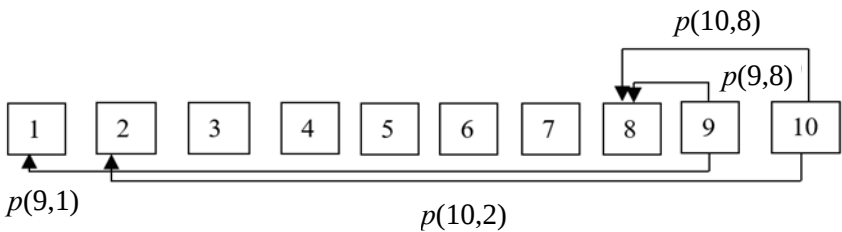


Рис. 2. Цепь Маркова и схема переходов частиц из ячеек в ячейки

Рассмотрим более подробно определение элементов матрицы $p(i, j)$, то есть вероятностей перехода из ячейки i в ячейку j , в обобщенном виде. По вектору состояния определяем номер элемента $i_{\text{ср}}$, в котором находятся частицы, имеющие среднюю толщину $h_{\text{ср}}$ для всех частиц. В рассматриваемом примере среднюю толщину имеют частицы в ячейке номер 9. Одним из варьируемых элементов предлагаемой модели является величина зазора Δ между стержнем и внутренней поверхностью барабана. Поскольку максимальное число частиц имеет толщину $h_{\text{ср}}$, логично предположить, что величина зазора равна $h_{\text{ср}}$ или немного меньше данной величины. Предположим, что зазор равен $h_{\text{ср}} = 100$ нм, таким образом, в нашем случае – это ячейка номер 8. Поскольку толщина частиц в ячейках 1, ..., 8 меньше или равна величине зазора, то эти частицы не будут участвовать в процессе эксфолиации и для них вероятности $p(i, i)$ равны 1. Вторым варьируемым элементом предлагаемой модели является вероятность p_3 неучастия остальных частиц в процессе эксфолиации. Численное значение данной величины определяется при идентификации параметров модели. Частицы со средней толщиной, равной зазору, находятся в ячейке с номером i_z . В результате эксфолиации частицы из ячейки с номером $i > i_z$ образуются две частицы, одна из которых переходит в ячейку с номером i_z , а вторая – в ячейку $i - i_z$. Суммарная вероятность перехода в данные ячейки будет равна единице

$$p(i, i_z) + p(i, i - i_z) + p_3 = 1. \quad (5)$$

В работе [14] установлено, что форму наночастицы графита можно представить в виде трехосного эллипсоида с длиной a , шириной b и толщиной h . Между этими параметрами имеется взаимосвязь, то есть в первом приближении численные значения a и b можно выразить через h с некоторым коэффициентом k . Объем частицы V равен

$$V = \frac{4\pi abh}{3} = kh^3. \quad (6)$$

Очевидно, что вероятности $p(i, i_z)$ и $p(i, i - i_z)$ соотносятся как массы или объемы частиц, которые участвуют в переходах. Учитывая данные обстоятельства, в общем случае можно составить следующее равенство:

$$\frac{p(i, i_z)}{p(i, i - i_z)} = \frac{i_z^3}{(i - i_z)^3}. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) и преобразований получим:

$$p(i, i - i_z) = \frac{(i - i_z)^3(1 - p_3)}{i_z^3 + (i - i_z)^3}; \quad (8)$$

$$p(i, i_z) = 1 - p_3 - p(i, i - i_z). \quad (9)$$

Отдельно необходимо рассмотреть случай, когда $i = mi_z$, где m – целое число больше 1, поскольку в этом случае часть частиц с вероятностью p_3 останется в ячейке i , а все остальные частицы с вероятностью $p(i, i_z) = 1 - p_3$ перейдут в ячейку с номером z .

В результате эксфолиации части частиц графита, распределение частиц по ячейкам изменилось и ячейка, в которой содержатся частицы среднего размера,

сместилась влево. Состояние системы определяется следующими рекуррентными соотношениями:

$$\begin{aligned} S(1) &= S(0) \times P(1) \\ S(2) &= S(1) \times P(2) \\ &\dots \\ S(k) &= S(k-1) \times P(k). \end{aligned} \tag{10}$$

где $S(j)$ – вектор состояния системы после перехода j ; P – матрица переходных вероятностей; k – номер перехода, на котором заканчивается процесс.

После каждого шага (перехода) определяется номер ячейки, в которой находятся частицы со средней толщиной, и назначается зазор, то есть определяется номер ячейки i_z . Далее рассчитываются элементы матрицы переходных вероятностей (3).

На рисунке 3 показаны гистограммы распределения частиц по ячейкам в процессе эксфолиации. Для наглядности и простоты анализа гистограмм и работы модели взято $n = 10$ фракций. Интервал распределения исходных частиц 0...4000 нм, размер каждой фракции $h = 400$ нм. Исходное распределение по фракциям соответствует параметрам плотности нормального распределения $\mu = 3200$ нм, $\sigma = 200$ нм. Исходный зазор соответствует номеру фракции 8, где размеры частиц находятся в диапазоне 2800...3200 нм, а вероятность неучастия частиц в процессе эксфолиации $p(e) = 0,5$. Расчет по модели прекращается, когда более 60 % массы частиц оказывается в первой фракции, то есть имеют размер от 0 до 400 нм.

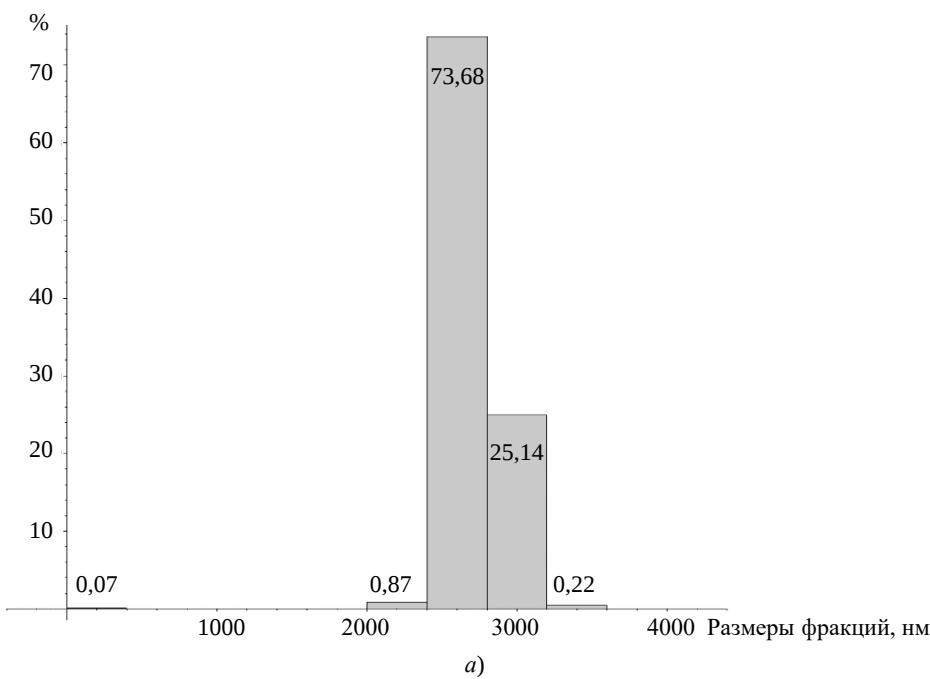


Рис. 3. Гистограммы распределения частиц по ячейкам в процессе эксфолиации после циклов обработки (начало):
a – 1

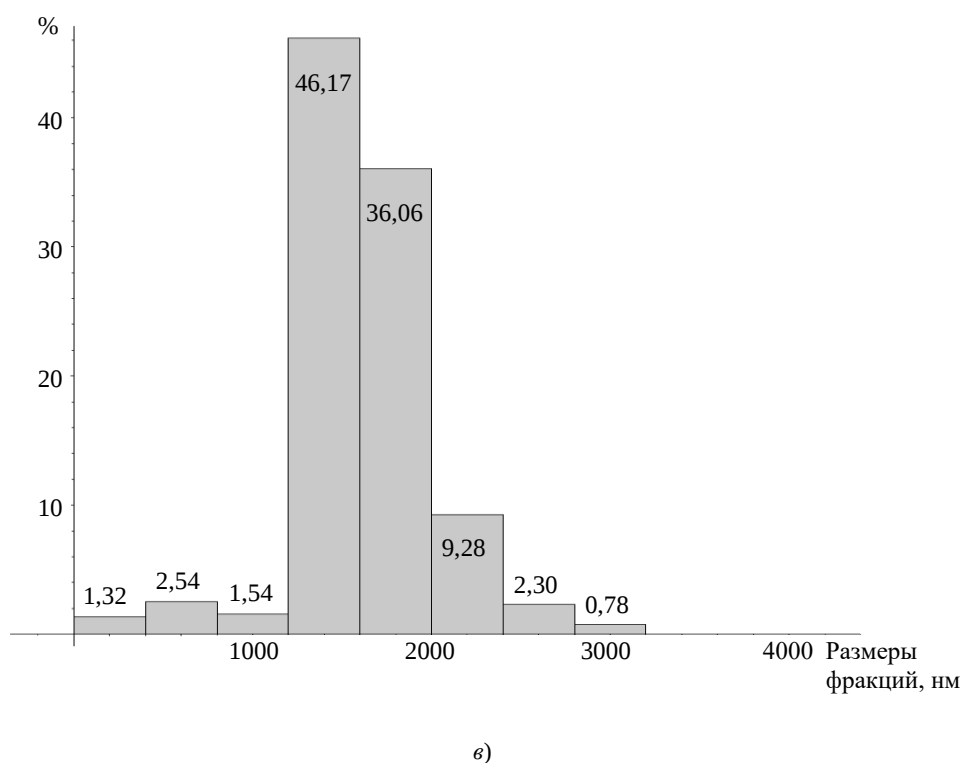
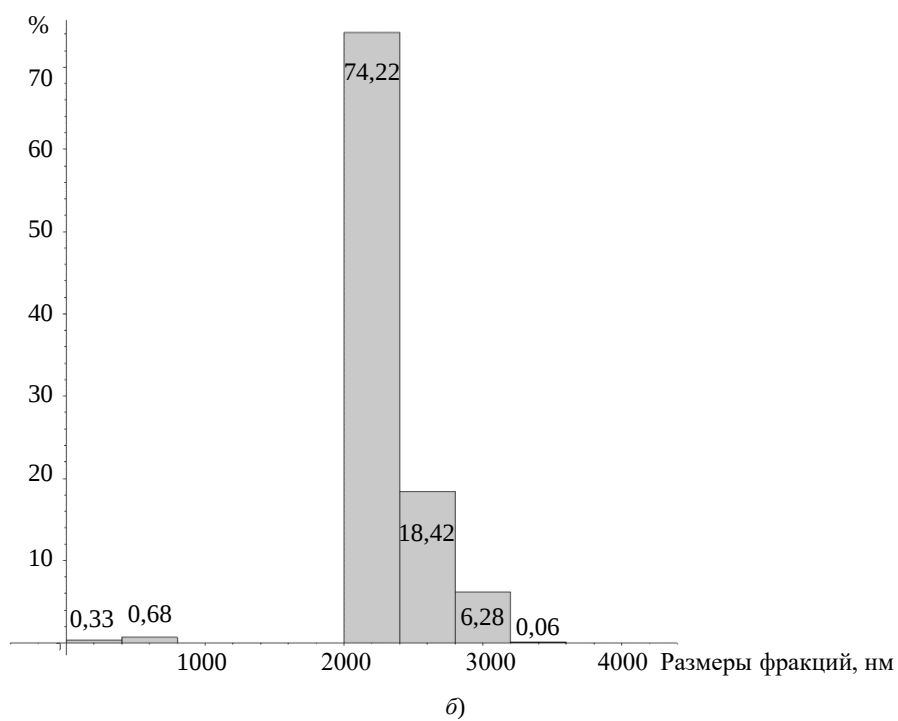


Рис. 3. Продолжение: б – 3; в – 6

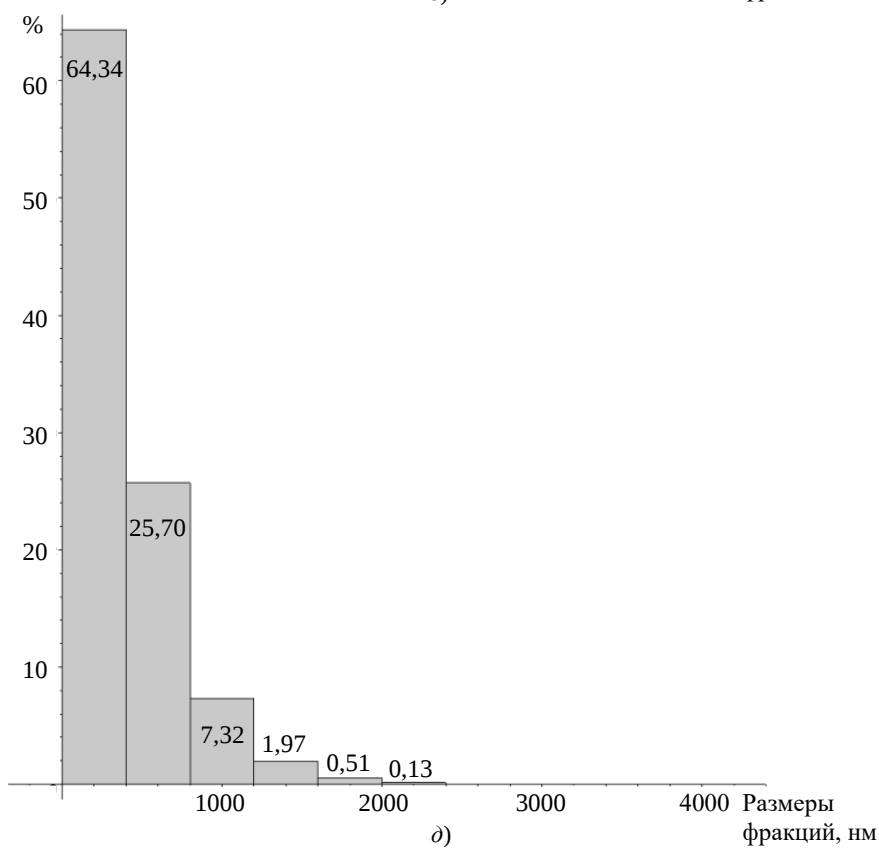
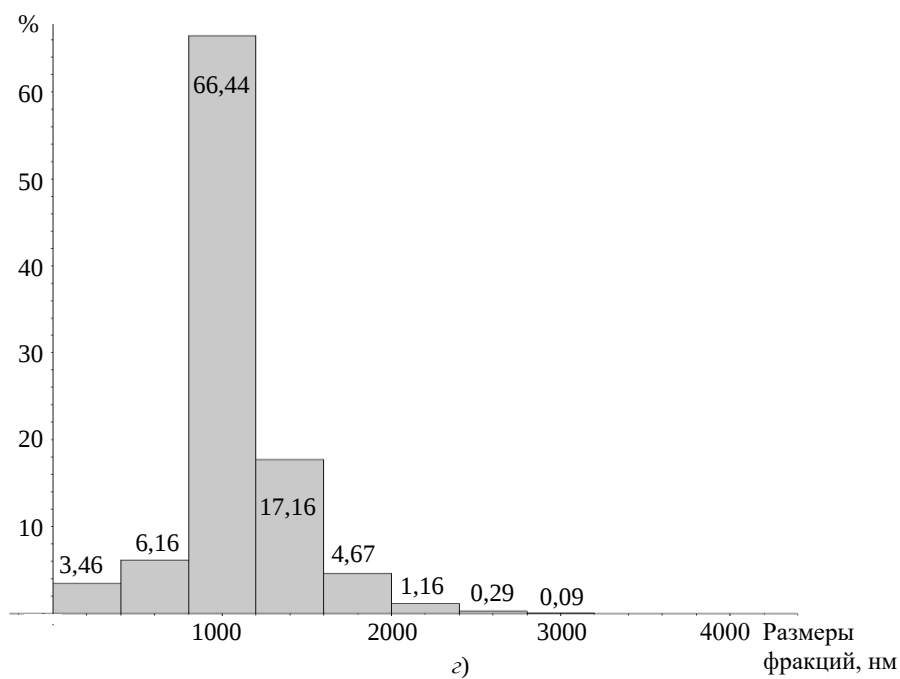


Рис. 3. Окончание: $\varepsilon - 9$; $\delta - 13$

Из диаграмм видно, что средняя толщина частиц уменьшается и гистограмма смещается влево.

Численный эксперимент

Перед идентификацией варьируемых параметров математической модели целесообразно провести численный эксперимент в целях выяснения влияния каждого из параметров на кинетику процесса эксфолиации. В предлагаемой модели варьируемыми являются следующие параметры: неучастие частиц в процессе эксфолиации $p(e)$; время одного перехода Δt , с; исходное распределение частиц в суспензии по размерам μ и σ ; исходный зазор между стержнями и внутренней поверхностью барабана, как доля от среднего размера частиц. Проводить численный эксперимент по влиянию времени одного перехода не имеет смысла, поскольку совершенно очевидно, чем меньше время одного перехода, тем меньше время процесса эксфолиации.

В *первой* серии численных экспериментов исследовали влияние $p(e)$ на кинетику процесса и использовали следующие данные: интервал распределения исходных частиц 0...4000 нм; исходное распределение по фракциям соответствует параметрам плотности нормального распределения $\mu = 3000$, $\sigma = 200$; зазор соответствует номеру фракции 30, где среднее распределения $f[30] = 2900...3000$ нм. На рисунке 4 показана зависимость числа переходов k , которые необходимо совершить для того, чтобы более 60 % массы частиц оказались в первой фракции, то есть имели размер от 0 до 100 нм.

Из графика видно, что при возрастании p_e увеличивается время процесса эксфолиации и особенно сильно это заметно при повышении p_e более 0,8. Учитывая данный результат, экспериментально установлено, что максимальной участие в процессе эксфолиации обеспечивается при толщине слоя обрабатываемой суспензии, не превышающей 5 мм.

Во *второй* серии численных экспериментов исследовалось влияние величины зазора между стержнями и внутренней поверхностью барабана. Для наглядности, зазор определяли номером фракции f_n , которая его образует. На рисунке 5 показаны зависимости числа переходов до окончания процесса от номер фракции, соответствующей начальному зазору f_n . На графиках видно, что минимальное время эксфолиации наблюдается в том случае, когда зазор составляет примерно половину максимальной толщины исходных частиц.

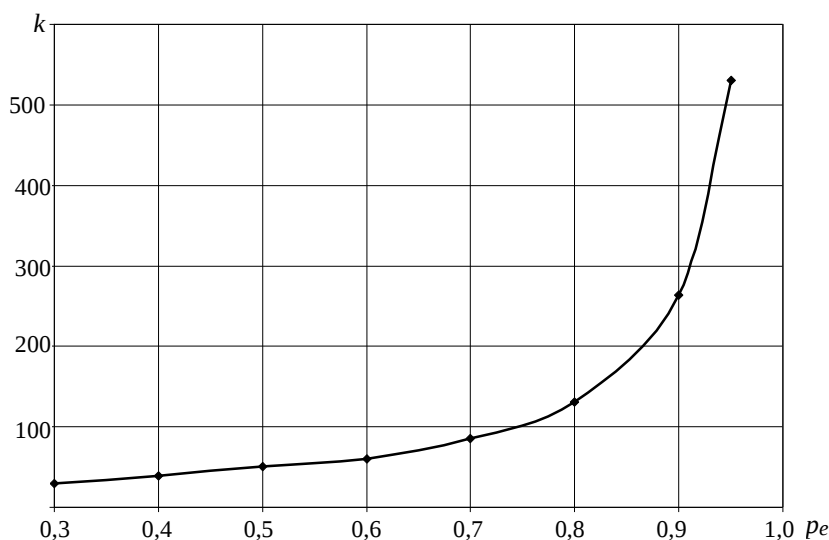


Рис. 4. Зависимость переходов от вероятности неучастия частиц в процессе эксфолиации p_e

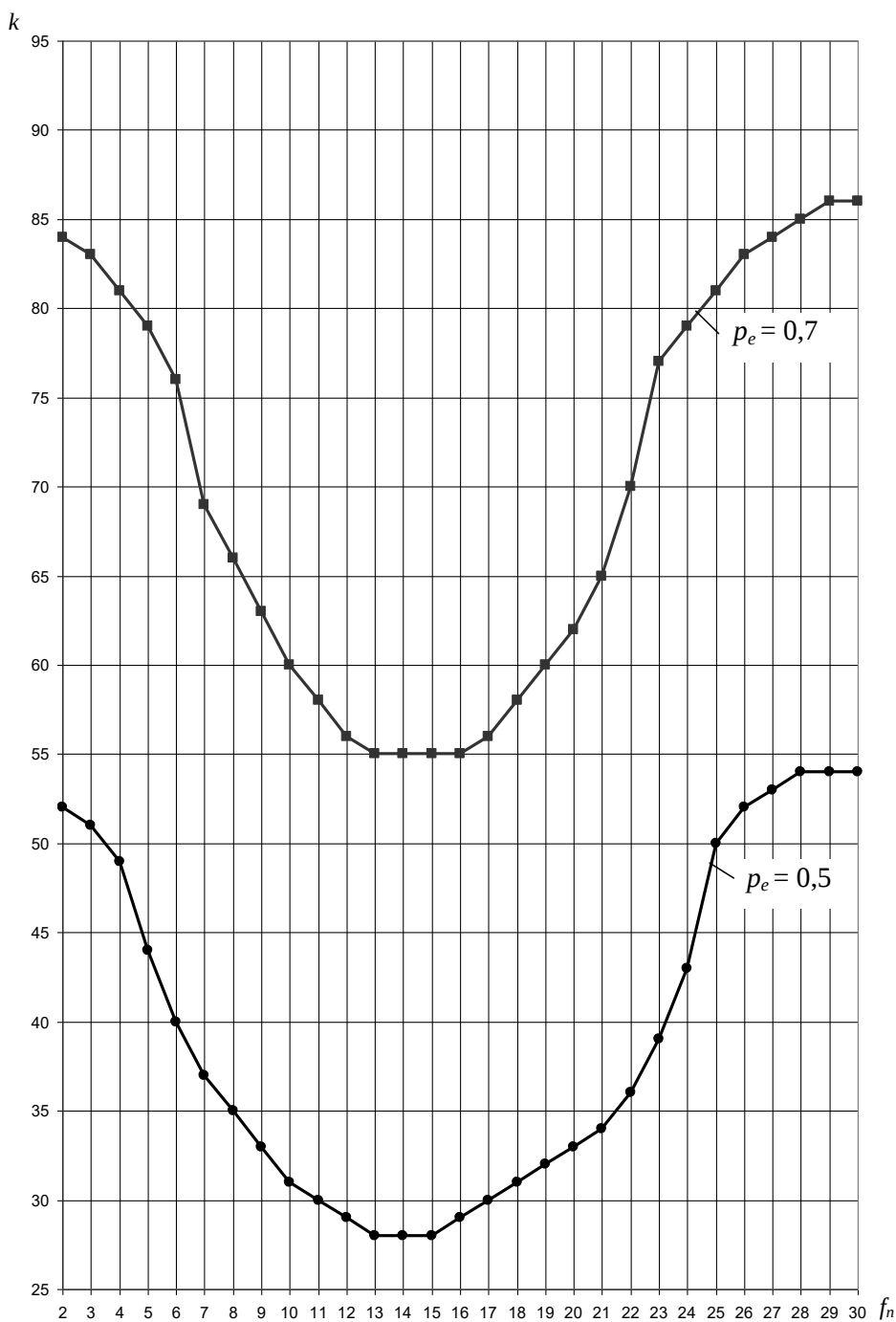


Рис. 5. Зависимости числа переходов k до окончания процесса от номера фракции, соответствующей начальному зазору f_n

В третьей серии численных экспериментов исследовалось влияние исходного распределения частиц по размерам на продолжительность процесса эксфолиации. На рисунке 6 показаны зависимости продолжительности процесса эксфолиации k от среднего размера частиц в исходной суспензии μ . Из графиков видно,

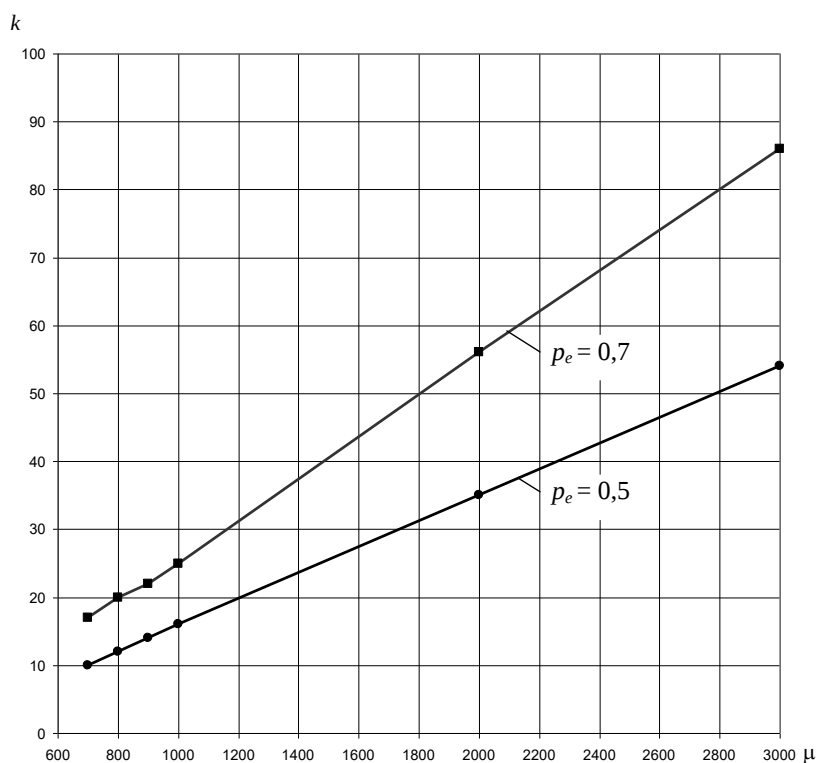


Рис. 6. Зависимость продолжительности процесса эксфолиации от начального распределения частиц по размерам μ

что с увеличением среднего размера частиц, время процесса увеличивается. Данный факт говорит о том, что для приготовления исходной суспензии необходимо использовать графит с минимальным размером частиц.

Предлагаемую математическую модель можно использовать на разных стадиях процесса. Например, сравнение результатов предварительных экспериментов с расчетами показали, что предлагаемая модель может быть использована для описания процесса эксфолиации в стержневой барабанной мельнице непрерывного принципа действия.

Представление исходного материала, поступающего в стержневую мельницу, в виде совокупности фракций, каждая из которых содержит число графеновых слоев, кратное 100, позволило сократить время идентификации параметров и объем расчетов по модели более чем в два раза.

Заключение

Предложен новый механизм эксфолиации порошка графита в стержневой барабанной мельнице. Представление гранулометрического состава порошка в виде совокупности фракций с фиксированными диапазонами изменения толщины частиц позволит значительно сократить время идентификации параметров модели, время расчета конечного состояния системы и даст возможность рассчитывать параметры последующих операций обработки и использования нанопластин графита для создания новых функциональных и конструкционных материалов. В результате проведения численных экспериментов по разработанной модели установлено влияние отдельных параметров на интенсивность процесса эксфолиации в стержневой барабанной мельнице.

Список литературы

1. ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016. Нанотехнологии. Часть 4. Материалы наноструктурированные. Термины и определения. – Введ. 2016-11-09. – М. : Стандартиформ, 2016. – 14 с.
2. ГОСТ Р 54622-2011/ISO/TS 27687:2008. Нанотехнологии. Термины и определения нанообъектов. Наночастица, нановолокно и нанопластина. – Введ. 2011-12-08. – М. : Стандартиформ, 2013. – 14 с.
3. Yi, M. A Reviewon Mechanical Exfoliation for the Scalable Production of Graphene / M. Yi, Z. Shen // Journal Materials Chemistry A. – 2015. – Vol. 3, No. 22. – P. 11700 – 11715. doi: 10.1039/C5TA00252D
4. Structural Study on Graphene-Based Particles Prepared from Old Coconut Shell by Acid-Assisted Mechanical Exfoliation / M. A. Baqiya, A. Y. Nugraheni, W. Islamiyah, A. F. Kurniawan, M. M. Ramli, S. Yamaguchi, Y. Furukawa, S. Soontaranon, E. G. R. Putra, Y. Cahyono // Advanced Powder Technology. – 2020. – Vol. 31, No. 5. – P. 2072 – 2078. doi: 10.1016/j.appt.2020.02.039
5. Ren, S. Preparations, Properties and Applications of Graphene in Functional Devices: A Concise Review / S. Ren, P. Rong, Q. Yu // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44, No. 11. – P. 11940 – 11955. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.089
6. Pei, S. The Reduction of Graphene Oxide / S. Pei, H.-M. Cheng // Carbon. – 2012. – No. 50. – P. 3210 – 3228. doi: 10.1016/J.CARBON.2011.11.010
7. 0D to 3D Carbon-Based Networks Combined with Pseudocapacitive Electrode Material for High Energy Density Supercapacitor: A Review / S. Kumar, G. Saeed, L. Zhu, K.N. Hui, N.H. Kim, J.H. Lee // The Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 403, No. 8. – P. 126352. doi: 10.1016/j.cej.2020.126352
8. Understanding the Toxicity of Carbon Nanotubes / Y. Liu, Y. Zhao, B. Sun, C. Chen // Accounts of Chemical Research. – 2013. – Vol. 46, No. 3. – P. 702 – 713. doi: 10.1021/ar300028m
9. A Review on Graphene Fibers: Expecations, Advances, and Prospects / B. Fang, D. Chang, Z. Xu, C. Gao // Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32, No. 5. – P. 1902664. doi: 10.1002/adma.201902664
10. Suvarnaphaet, P. Graphene-Based Materials for Biosensors: A Review / P. Suvarnaphaet, S. Pechprasarn // Sensors. – 2017. – Vol. 17, No. 10. – P. 2161. doi: 10.3390/s17102161
11. Biomedical Application of Graphene: from Drug Delivery, Tumor Therapy, to Theranostics / S. Song, H. Shen, Y. Wang, X. Chu, J. Xie, N. Zhou, J. Shen // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2020. – No. 185. – P. 110596. doi: 10.1016/j.colsurfb.2019.110596
12. Модифицирование пластичных смазок нанопластинами графита / В. Ф. Першин, С. С. Ю. Альдауд, А. Альгураби, А. Баити, Х. Салхи // Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Уфа, 2023. – С. 158 – 165.
13. Жумагалиева, Г. Б. Разработка и расчет стержневых барабанных мельниц для производства графеносодержащих концентратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Б. Жумагалиева. – Тамбов, 2020. – 16 с.
14. Аль-Машхадани, А. М. Р. Взаимосвязь между формой частиц исходного графита и графеновых пластин при жидкофазной эксфолиации / А. М. Р. Аль-Машхадани, В. Ф. Першин // Материаловедение. Энергетика. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 145 – 158.
15. Пат. 2792428 Российская Федерация С1. Стержневая барабанная мельница непрерывного принципа действия // В. Ф. Першин, С. С. Ю. Алдауд, А. А. Осипов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2022118998 ; заявл. 12.07.2022 ; опубл. 22.03.2023, Бюл. 9. – 7 с.

Mathematical Model of the Graphite Exfoliation Process in Bar Drum Mill

S. S. Yu. Aldawood¹, A. A. Baranov², V. F. Pershin¹✉

Departments: “Technological Processes, Devices and Technosphere Safety”, pershin.home@mail.ru (1); “Engineering and Technologies for the Production of Nanoproducts”(2), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: graphite; few-layer graphene; multilayer graphene; shear exfoliation; suspension.

Abstract: The features of the process of graphite exfoliation in a rod drum mill are considered and it is established that a gap of crushed particles is formed between the grinding rods and the inner surface of the drum, and the size of this gap decreases during the exfoliation process. A mechanism for the exfoliation process has been proposed, according to which the separation of particles occurs after they pass through a given gap. The original graphite powder is presented as a set of fractions with the same particle size ranges. To model the process, the mathematical apparatus of random Markov processes, discrete in space and time, was used. An example of using the model to determine the particle size distribution during the exfoliation process is given.

References

1. GOST ISO/TS 80004-4-2016. *Nanotechnologies. Part 4. Nano-structured materials. Terms and Definitions* [ISO/TS 80004-4:2011, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 4: Nanostructured materials (IDT)], Moscow: Izdatel'stvo stsndartov, 2016, 14 p. (In Russ.)
2. GOST R 54622-2011/ISO/TS 27687:2008. *Nanotechnologies. Terms and definitions of nanoobjects. Nanoparticle, nanofiber and nanoplate* [ISO/TS 27687:2008. Nanotechnologies – Terminology and definitions for nano-objects – Nanoparticle, nanofibre and nanoplate (IDT)], Moscow: Izdatel'stvo stsndartov, 2013, 14 p. (In Russ.)
3. Yi M., Shen Z. A Review on Mechanical Exfoliation for the Scalable Production of Graphene, *Journal Materials Chemistry A.*, 2015, vol. 3, no. 22, pp. 11700-11715. doi: 10.1039/C5TA00252D
4. Baqiya M.A., Nugraheni A.Y., Islamiyah W., Kurniawan A.F., Ramli M.M., Yamaguchi S., Furukawa Y., Soontaranon S., Putra E.G.R., Cahyono Y. Structural Study on Graphene-Based Particles Prepared from Old Coconut Shell by Acid-Assisted Mechanical Exfoliation, *Advanced Powder Technology*, 2020, vol. 31, no. 5, pp. 2072-2078. doi: 10.1016/j.appt.2020.02.039
5. Ren S., Rong P., Yu Q. Preparations, Properties and Applications of Graphene in Functional Devices: A Concise Review, *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 11, pp. 11940-11955. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.089
6. Pei S., Cheng H.-M. The Reduction of Graphene Oxide, *Carbon*, 2012, no. 50, pp. 3210-3228. doi: 10.1016/J.CARBON.2011.11.010
7. Kumar S., Saeed G., Zhu L., Hui K.N., Kim N.H., Lee J.H. 0D to 3D Carbon-Based Networks Combined with Pseudocapacitive Electrode Material for High Energy Density Supercapacitor: A Review, *The Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 403, no. 8, pp. 126352. doi: 10.1016/j.cej.2020.126352
8. Liu Y., Zhao Y., Sun B., Chen C. Understanding the Toxicity of Carbon Nanotubes, *Accounts of Chemical Research*, 2013, vol. 46, no. 3, pp. 702-713. doi: 10.1021/ar300028m
9. Fang B., Chang D., Xu Z., Gao C. A Review on Graphene Fibers: Expecations, Advances, and Prospects, *Advanced Materials*, 2020, vol. 32, no. 5, pp. 1902664. doi: 10.1002/adma.201902664

10. Suvarnaphaet P., Pechprasarn S. Graphene-Based Materials for Biosensors: A Review, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 10, pp. 2161. doi: 10.3390/s17102161
11. Song S., Shen H., Wang Y., Chu X., Xie J., Zhou N., Shen J. Biomedical Application of Graphene: from Drug Delivery, Tumor Therapy, to Theranostics, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020, no. 185, pp. 110596. doi: 10.1016/j.colsurfb.2019.110596
12. Pershin V.F., Aldawood S.S.Yu., Algurabi A., Baiti A., Salkhi H. [Modification of greases with graphite nanoplates], *Sbornik nauchnykh statey po materialam XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Chast' 1* [Collection of scientific articles based on the materials of the XII International Scientific and Practical Conference. Part 1], Ufa. 2023, pp. 158-165. (In Russ.)
13. Zhumagalieva G.B. *Extended abstract of candidate's of Engineering thesis*, Tambov, 2020, 16 p. (In Russ.)
14. Al-Mashhadani A.M.R., Pershin V.F. [Relationship between the shape of particles of the original graphite and graphene plates during liquid-phase exfoliation], *Materialovedeniye. Energetika* [Materials Science. Energy], 2021, vol. 27, no. 4, pp. 145-158. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Pershin V.F., Aldawood S.S.Yu., Osipov A.A. *Sterzhnevaya barabannaya mel'nitsa nepreryvnogo printsipa deystviya* [Rod drum mill of continuous operating principle], Russian Federation, 2023, Pat. 2792428 (In Russ.)
-

Mathematisches Modell des Peeling-Prozesses von Grafit in der Stabtrommelmühle

Zusammenfassung: Die Merkmale des Graphit-Peeling-Prozesses in einer Stabtrommelmühle sind betrachtet und es ist festgestellt, dass sich zwischen den Mahlstäben und der Innenfläche der Trommel ein Spalt aus zerkleinerten Partikeln bildet und die Größe dieses Spalts während des Peeling-Prozesses abnimmt. Es ist ein Mechanismus für den Peeling-Prozess vorgeschlagen, bei dem die Trennung der Partikel erfolgt, nachdem sie diesen Spalt passiert haben. Das ursprüngliche Graphitpulver ist als eine Reihe von Fraktionen mit denselben Partikelgrößenbereichen dargestellt. Zur Modellierung des Prozesses ist der mathematische Apparat der räumlich und zeitlich diskreten zufälligen Markov-Prozesse verwendet. Es ist ein Beispiel für die Verwendung des Modells zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung während des Peeling-Prozesses gegeben.

Modèle mathématique du processus d'exfoliation du graphite dans le moulin à tambour à tige

Résumé: Sont examinées les caractéristiques du processus d'exfoliation du graphite dans le moulin à tambour à tige. Est établi qu'un espace entre les tiges de broyage et la surface interne du tambour est formé à partir des particules broyées, et la valeur de cet espace diminue lors du processus d'exfoliation. Est proposé le mécanisme du processus d'exfoliation, selon lequel la stratification des particules se produit après leur passage à travers cet espace. La poudre de graphite brute est représentée comme une collection de fractions avec des plages de tailles des particules identiques. Pour modéliser le processus, est utilisé un appareil mathématique de processus aléatoires de Markov, discrets dans l'espace et le temps. Est donné un exemple d'utilisation du modèle lors de la détermination de la composition granulométrique dans le processus d'exfoliation.

Авторы: *Альдавуд Саиф Сухаил Юсуф* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Баранов Андрей Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ДЫМОЗАЩИТНОГО КАПЮШОНА

В. А. Еськов ^{1,2}, Р. В. Дорохов ², А. Н. Пахомов ^{1✉}

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

Ключевые слова: средства защиты, органы дыхания, дым, пластина, регенеративный материал, источник кислорода, надпероксид калия, пероксид кальция.

Аннотация: Представлены результаты разработки пористых пластинчатых регенеративных материалов на основе надпероксида калия и пероксида кальция. Пероксидные соединения синтезируются в вакууме из жидкофазной смеси дипероксигидратов пероксида калия и пероксида кальция с подводом тепла в виде инфракрасного излучения и закрепляются в порах и на волокнах стекловолоконной матрицы. Введение в состав регенеративного материала пероксида кальция улучшает хемосорбционные свойства получаемого материала за счет образования тугоплавких и менее гидрофильных, чем соединения калия, соединений кальция. Это позволяет сохранить пространственную структуру и пористость пластин в процессе эксплуатации. Пластины регенеративного материала предлагаются к применению в дымозащитных капюшонах.

Введение

Дымозащитный капюшон (ДЗК) – изделие изолирующего типа, предназначенное для индивидуальной защиты головы и органов дыхания экипажа от огня и дыма при аварийном задымлении кабины и/или салона самолета гражданской авиации. Необходимый для дыхания кислород образуется путем взаимодействия выдыхаемых человеком паров воды и диоксида углерода с регенеративным материалом на основе надпероксида калия. В аппарате использована маятниковая схема циркуляции газовой дыхательной смеси (ГДС). Такая схема характеризуется двукратным прохождением ГДС через регенеративный материал на фазах вдоха и выдоха и обеспечивает высокую степень очистки ГДС от диоксида углерода. Кроме того, она проста в эксплуатации за счет отсутствия дополнительных газоходов и перепускных элементов в конструкции ДЗК.

В состав ДЗК входят капюшон 1 с обзорным окном 2, шейная мембрана (обтюратор), исключающая проникновение дыма под капюшон 3, устройство для коммуникации 4, позволяющее вести переговоры, патрон с регенеративным материалом 5, система крепления и индивидуальной подгонки 6, пусковое устройство 7, предназначенное для обеспечения кислородом в первые минуты использования ДЗК, соединительные шланги 8, дыхательный мешок с клапаном избыточного давления 9 (рис. 1) [1, 2].

При включении человека в ДЗК органы дыхания и зрения изолируются от окружающей среды. Газовая дыхательная смесь от пользователя по соединительным шлангам попадает в патрон с регенеративным материалом, где происходят процессы поглощения диоксида углерода и влаги, сопровождающиеся выделением кислорода.

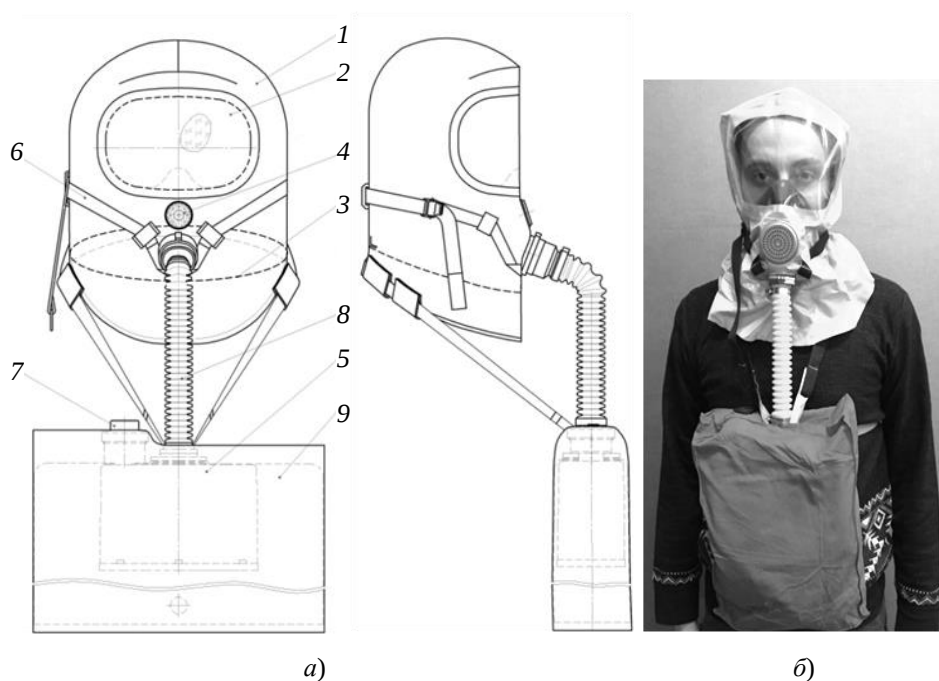


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) дымозащитного капюшона

Из патрона ГДС поступает в дыхательный мешок. При вдохе обогащенная кислородом и очищенная от диоксида углерода ГДС из дыхательного мешка по соединительным шлангам возвращается в органы дыхания. Избыток ГДС из дыхательного мешка при выдохе стравливается через клапан избыточного давления [3]. Процесс поглощения диоксида углерода и влаги в патроне сопровождается выделением тепла. Поэтому при работе происходит нагрев проходящей через патрон дыхательной смеси. Признаком окончания работы регенеративного материала является прекращение выделения кислорода, при котором происходит уменьшение наполнения дыхательного мешка.

Дымозащитный капюшон работоспособен в интервале окружающих температур от -15 до $+55$ °С, обеспечивает подачу кислорода для каждого члена экипажа продолжительностью 15 мин при полете на барометрической высоте 2438 м, при сопротивлении вдоху или выдоху 750 Па при легочной вентиляции 30 $\text{дм}^3/\text{мин}$. В любой момент времени может быть достигнут объемный расход кислорода для дыхания, равный 80 $\text{дм}^3/\text{мин}$, в течение 30-секундного периода. Объемная доля диоксида углерода во вдыхаемой ГДС не более 4 % (допускается увеличение объемной доли диоксида углерода до 5 % на период, не превышающий 2 мин). Время приведения в рабочее состояние не более 10 с. Лицевая часть обеспечивает общее поле зрения не менее 70 % от поля зрения человека без лицевой части. В дымозащитном капюшоне имеется возможность коммуникации через терминалы связи бортпроводников и переносной мегафон, а также возможность переговоров между людьми, надевшими ДЗК, на расстоянии не менее 4 м.

Регенерация воздуха перекисными соединениями щелочных и щелочноземельных металлов

Широкое применение перекисных соединений щелочных металлов в качестве регенеративного материала в изолирующих дыхательных аппаратах и установках регенерации воздуха коллективного типа основано на их способности по-

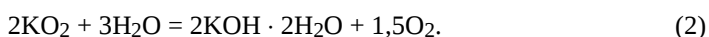
глощать диоксид углерода и пары воды, а также выделять кислород, тем самым обеспечивая жизнедеятельность человека при его изоляции от окружающей атмосферы.

Наибольшее распространение получили надпероксиды калия и натрия, при этом первый из них, за счет более простой технологии получения, нашел применение в массовых средствах и системах регенерации, а надпероксид натрия, за счет более высокого содержания кислорода, – в специализированных средствах и системах жизнеобеспечения.

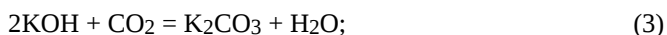
Взаимодействие надпероксида калия с диоксидом углерода в присутствии водяного пара описывается уравнением [4]



При этом первичным актом в процессе регенерации является взаимодействие KO_2 с водяным паром по уравнению [5]



Затем идет образование карбоната или бикарбоната калия соответственно по уравнениям реакций:



Пары воды связываются гидроксидом и карбонатом калия, образуя гидратные соединения типа: $KOH \cdot 0,75H_2O$; $KOH \cdot H_2O$; $KOH \cdot 2H_2O$; $K_2CO_3 \cdot 0,5H_2O$; $K_2CO_3 \cdot 1,5H_2O$, которые также могут обратно разлагаться под воздействием высоких температур.

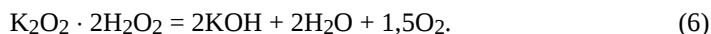
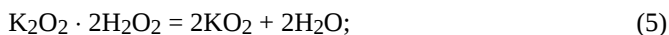
В чистом виде надпероксиды калия и натрия не применяются вследствие возможности их плавления, а также плавления продуктов реакции, образующихся под воздействием высоких температур, достигающих $300^\circ C$, образования пористых оболочек с закрытой структурой, состоящих из смеси гидратов продуктов реакций, препятствующих диффузии реагентов к исходному надпероксиду.

Решение данных проблем, а также технологических проблем, связанных с изготовлением регенеративного материала, достигают введением функционализирующих и структурообразующих добавок, влияющих на его химические и физические свойства [6]. Например, применяют соединения меди, железа и другие в качестве катализатора выделения кислорода, средне- и длиноволокнистый хризотилловый асбест – в качестве армирующего компонента пластин, соединения кальция – в качестве структурообразующих добавок, уменьшающих оплывание регенеративного продукта.

Традиционная технология производства регенеративного материала включает стадии производства надпероксида щелочного металла в виде порошка, смешения с функционализирующими и структурообразующими добавками, прессования блоков, таблеток, готового исполнения или дробления и отсева при производстве гранул неправильной формы, измельчения отходов и возврата их на стадию смешения.

В АО «Росхимзащита» разработана технология производства регенеративного продукта в виде пористых пластин на основе надпероксида калия РПК-П ТУ 2123-265-05807954-2011. Технология основана на взаимодействии гидроксида калия и пероксида водорода с образованием жидкой фазы, содержащей в основном дипероксогидрат пероксида калия, и последующим диспропорционированием в вакууме с подводом тепла в виде ИК-излучения. Реакция диспропорционирования $K_2O_2 \cdot 2H_2O_2$ экзотермична. В зависимости от окружающих условий может

протекать по двум направлениям: по реакции (5), основным продуктом которой является KO_2 , либо по реакции (6), где основным продукт – KOH , при этом активный кислород выделяется в атмосферу:

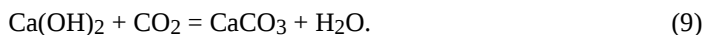
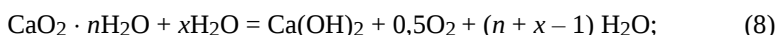


В состав регенеративного продукта РПК-П входит гидроксид калия (около 20 масс. %), образующийся по уравнению реакции (6). Применение гидроксида калия обеспечивает при недостатке паров воды (при низких окружающих температурах) реакционную воду, необходимую для разложения надпероксида калия, однако при этом, как правило, возникает ее избыток. При избытке реакционной воды образуются гидраты, что приводит к разрушению пористой структуры хемосорбента и соответственно торможению процесса поглощения диоксида углерода и паров воды.

Регенеративный материал с улучшенными эксплуатационными характеристиками

Для уменьшения негативного фактора гидрализации продуктов реакции разработан технологический процесс производства регенеративного материала, состоящего из надпероксида калия и пероксида кальция РМКК-П, ТУ 20.12.1-325-05807954-2017.

Пероксид кальция, входящий в состав регенеративного материала, под воздействием тепла и воды реагирует по уравнениям реакций:



Пероксид кальция, разлагаясь и поглощая избыточную воду, образует гидроксид кальция, который, реагируя с диоксидом углерода, образует карбонат. Карбонат кальция, в отличие от карбоната калия, практически не гидрализуется. В результате, сохраняется пористая структура хемосорбента и не происходит торможение процесса поглощения диоксида углерода и паров воды, возникающее из-за разрушения пор сорбента при гидрализации.

В результате добавления пероксида кальция сохраняется пористая структура хемосорбента, что позволяет получать регенеративный материал в виде пластин меньших размеров, чем пластины, получаемые без применения добавки пероксида кальция. При этом сорбционная емкость материала РМКК-П по диоксиду углерода составляет $174,1 \text{ дм}^3/\text{кг}$, аналогичный показатель для РПК-П составляет $139,4 \text{ дм}^3/\text{кг}$. Соответственно, за счет более высокой степени отработки регенеративного материала с добавкой пероксида кальция имеется возможность получить регенеративный материал в виде пластин с меньшими массогабаритными характеристиками, чем серийные регенеративные продукты, получаемые методом прессования-дробления [7]. Была разработана технология получения регенеративных пластин РМКК-П с размерами до $450 \times 430 \text{ мм}$, толщиной от 5 до 8 мм и удельным весом от 250 до 350 кг/м^3 . Для сравнения пластины РПК-П имеют размеры $140 \times 220 \text{ мм}$.

Результаты испытаний и обсуждение

Результаты испытаний ДЗК с пластинами разработанного регенеративного материала РМКК-П на установке «Искусственные легкие» (ИЛ) при температурах -15 , $+24$ и $+55$ °C и легочной вентиляции $30 \text{ дм}^3/\text{мин}$ представлены на рис. 2.

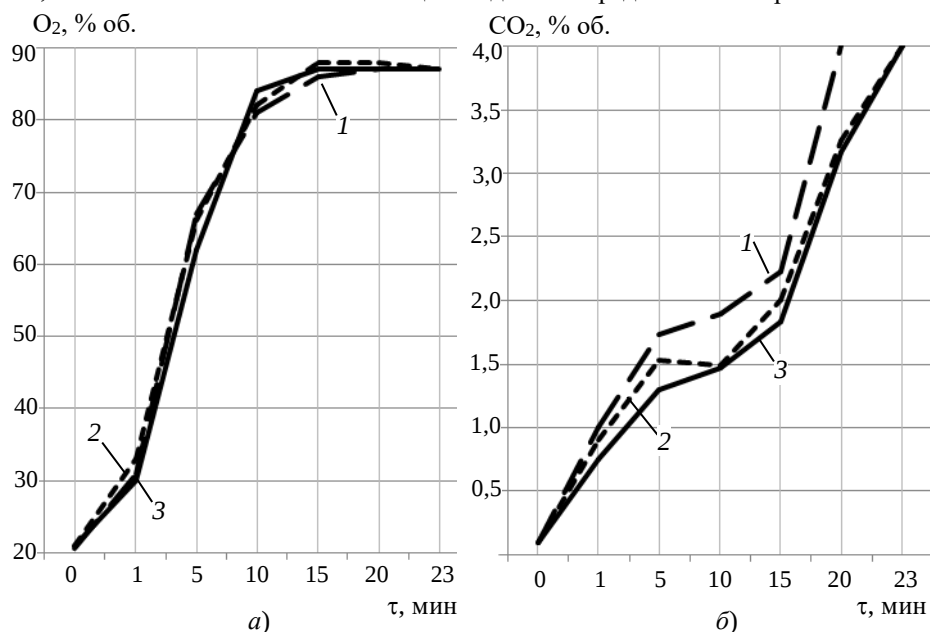


Рис. 2. Зависимость объемной доли кислорода (а) и углекислого газа (б) на входе от времени при температурах, °C:
1 – $+55$; 2 – $+24$; 3 – минус 15

Как видно из графиков рис. 2, а, выделение кислорода при работе ДЗК регенеративным материалов РМКК-П практически не зависит от температуры окружающей среды. Поглощение углекислого газа (рис. 2, б) незначительно зависит от температуры окружающей среды. С повышением окружающей температуры до $+55$ °C скорость поглощения CO_2 несколько снижается, что отражается в более

Таблица 1

Характеристики ДЗК и аналогов

Наименование (фирма и страна производитель)	Источник кислорода	Время защитного действия, мин	Масса, кг	Время приведения в рабочее состояние, с	Срок службы, лет
PBE 15-40F-11, L'Air Liquide (Франция)	Тороидальный баллон со сжатым кислородом	15	1,5	8	10
Protective breathing equipment (PBE), Essex industries, Inc. (США)	Баллон со сжатым кислородом		1,44	15	
Охусcrew, В/Е Aerospace, Inc. (США)	Регенеративный продукт на основе надпероксида калия		2,5		
ДЗК (Россия)	Регенеративный		1,3	10	

	продукт на основе надпероксида калия с добавкой пероксида кальция				
--	--	--	--	--	--

быстром росте величины объемной доли CO₂. Последнее вызвано более активным плавлением регенеративного материала. При температуре испытания –15 °С и +24 °С процесс поглощения CO₂ имеет схожий характер.

Для сравнения в таблице 1 представлены характеристики основных средств индивидуальной защиты органов дыхания, применяемых в гражданской авиации. Разработанный ДЗК, использующий регенеративный материал РМКК-П, удовлетворяет показателям, предъявляемым к подобного рода средствам индивидуальной защиты органов дыхания, и является конкурентно способным изделием для применения в гражданской авиации.

Заключение

Добавление пероксида кальция в регенеративный материал позволяет сохранить пористую структуру хемосорбента и исключить торможение процесса поглощения диоксида углерода и паров воды, возникающее из-за разрушения пор сорбента при гидрализации, то есть получить регенеративный материал РМКК-П в виде пластин меньших размеров, в сравнении с пластинами, получаемыми без применения добавки пероксида кальция РПК-П. При этом на 25 % увеличивается сорбционная емкость материала РМКК-П по диоксиду углерода по сравнению с материалом РПК-П. В результате, за счет более высокой степени отработки регенеративного материала с добавкой пероксида кальция, в производственных условиях получен регенеративный материал в виде пластин с меньшими массогабаритными характеристиками, чем серийные регенеративные продукты, получаемые методом прессования-дробления. Испытания материала РМКК-П в составе изделия ДЗК-15 на установке «Искусственные легкие» в различных режимах подтвердило эффективность его применения в средствах индивидуальной защиты органов дыхания, в частности, в дымозащитных капюшонах при чрезвычайных ситуациях на самолетах гражданской авиации.

Список литературы

1. Вольнов, И. И. Перекисные соединения щелочных металлов / И. И. Вольнов. – М. : Наука, 1980. – 159 с.
2. Пат. RU 185705 U1 Российская Федерация, МПК A62B 7/08 (2006.01). Изолирующий дыхательный аппарат / Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю., Еськов В. А., Рязанов И. В. ; Открытое акционерное общество «Корпорация «Росхимзащита». – № 2018131780 ; заявл. 03.09.18 ; опубл. 14.12.18, Бюл. № 35. – 15 с.
3. Мельников, А. Х. Исследование взаимодействия надперекиси калия с водяным паром и углекислым газом / А. Х. Мельников, Т. П. Фирсова, А. Н. Молодина // Журнал неорганической химии. –1962. – Т. 7, № 6. – С. 1228 – 1236.
4. Кинетика взаимодействия диоксида угдиссерлерода с надпероксидом калия / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий [и др.] // Химическая физика. – 2007. – Т. 26, № 10. – С. 67 – 70.
5. Дворецкий, Д. С. Кинетика взаимодействия диоксида углерода с регенеративным продуктом на матрице РПК-П / Д. С. Дворецкий, М. Ю. Плотников //

Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. – Т. 16, № 3. – С. 597 – 602.

6. Дорохов, Р. В. Аппаратурно-технологическое оформление процесса синтеза регенеративного продукта на матрице с улучшенными хемосорбционными характеристиками : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Дорохов Роман Викторович. – Тамбов, 2007. – 187 с.

7. Еськов, В. А. Влияние процесса сушки на качество регенеративного продукта на основе надпероксида калия / В. А. Еськов, А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 597 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.597-602

Regenerative Material with Improved Characteristics for the Smoke Protective Hood

V. A. Eskov ^{1,2}, R. V. Dorokhov ², A. N. Pakhomov ¹✉

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

Keywords: protective equipment; respiratory organs; smoke; plate; regenerative material; oxygen source; potassium superoxide; calcium peroxide.

Abstract: The results of the development of porous plate-like regenerative materials based on potassium superoxide and calcium peroxide are presented. Peroxide compounds are synthesized in vacuum from a liquid-phase mixture of potassium peroxide and calcium peroxide diperoxyhydrates with heat supplied in the form of infrared radiation and are fixed in the pores and on the fibers of the fiberglass matrix. The introduction of calcium peroxide into the composition of the regenerative material improves the chemisorption properties of the resulting material due to the formation of refractory and less hydrophilic calcium compounds than potassium compounds. This enables to maintain the spatial structure and porosity of the plates during operation. Plates of regenerative material are proposed for use in smoke protection hoods.

References

1. Vol'nov I.I. *Perekisnyye soyedineniya shchelochnykh metallov* [Peroxide compounds of alkali metals], Moscow: Nauka, 1980, 159 p. (In Russ.)
2. Dorokhov R.V., Ferapontov Yu.A., Plotnikov M.Yu., Yes'kov V.A., Ryazanov I.V. *Izoliruyushchiy dykhatel'nyy apparat* [Self-contained breathing apparatus], Russian Federation, 2088, Pat. 185705 (In Russ.)
3. Mel'nikov A.Kh., Firsova T.P., Molodina A.N. [Study of the interaction of potassium superoxide with water vapor and carbon dioxide], *Zhurnal neorganicheskoy khimii* [Journal of Inorganic Chemistry], 1962, vol. 7, no. 6, pp. 1228-1236. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretzkiy S.I. [et al.]. [Kinetics of interaction of carbon dioxide with potassium superoxide], *Khimicheskaya fizika* [Chemical Physics], 2007, vol. 26, no. 10, pp. 67-70. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Dvoretzkiy D.S., Plotnikov M.Yu. [Kinetics of interaction of carbon dioxide with a regenerative product on a pk-p matrix], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 597-602. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Dorokhov R.V. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2007. 187 p. (In Russ.)
7. Yes'kov V.A., Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts. [The influence of the drying process on the quality of a regenerative product based on potassium superoxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 597-602. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.597-602 (In Russ., abstract in Eng.)

Regeneratives Material mit verbesserten Eigenschaften für die Rauchschtzhaube

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Entwicklung poröser plattenförmiger regenerativer Materialien auf Basis von Kaliumsuperoxid und Calciumperoxid vorgestellt. Peroxidverbindungen werden im Vakuum aus einem Flüssigphasengemisch aus Kaliumperoxid und Calciumperoxiddiperoxohydraten unter Wärmezufuhr in Form von Infrarotstrahlung synthetisiert und in den Poren und auf den Fasern der Glasfasermatrix fixiert. Die Einführung von Calciumperoxid in die Zusammensetzung des regenerativen Materials verbessert die Chemosorptionseigenschaften des resultierenden Materials aufgrund der Bildung feuerfester und weniger hydrophiler Calciumverbindungen als Kaliumverbindungen. Dadurch bleibt die räumliche Struktur und Porosität der Platten während der Operation erhalten. Platten aus regenerierbarem Material werden für den Einsatz in Rauchschtzhauben angeboten.

Matériau régénératif à performances améliorées pour le capuchon de protection contre la fumée

Résumé: Sont présentés les résultats de l'élaboration des matériaux régénératifs poreux en forme de plaques à base de superoxyde de potassium et de peroxyde de calcium. Les composés peroxydés sont synthétisés sous vide à partir d'un mélange en phase liquide de peroxyde de potassium et de peroxyde de calcium diperoxyhydratés avec de la chaleur apportée sous forme de rayonnement infrarouge et sont fixés dans les pores et sur les fibres de la matrice en fibre de verre. L'introduction de peroxyde de calcium dans la composition du matériau régénérateur améliore les propriétés de chimisorption du matériau obtenu du fait de la formation des composés calciques réfractaires et moins hydrophiles que les composés potassiques. Cela permet de préserver la structure spatiale et la porosité des plaques lors de l'exploitation. Des plaques en matériaux régénératifs sont proposées pour l'utilisation dans les capuchons de protection contre la fumée.

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

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ КАРБАМИДОМЕЛАМИНОФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ

А. М. Истомин¹✉, Е. С. Бакунин¹, А. В. Рухов¹,
В. И. Истомина², И. А. Жабкина¹, М. С. Гончарова¹

*Кафедры: «Химия и химические технологии», andrewerer@mail.ru (1);
«Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: время желатинизации; карбамидомеламинаформальдегидная смола; отвердители; поликонденсация.

Аннотация: Разработан композиционный (комплексный) отвердитель на основе оксалата мочевины и пероксодисульфата аммония для ускорения реакции поликонденсации олигомерных цепочек карбамидомеламинаформальдегидных смол, а также снижения времени желатинизации (отверждения) связующих клеевых составов при производстве древесно-стружечных материалов. Представлены рецептура добавки, возможные механизмы реакций поликонденсации олигомеров и получения отвердителя. Рассмотрен механизм действия добавки и ее влияние на общие технические характеристики смолы. Приведена зависимость времени желатинизации смолы от содержания отвердителя.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации сформировалась развитая подотрасль производства древесных плит. За период с 2001 по 2016 гг. производство древесностружечных плит (ДСП) выросло с 2482 до 7400 тыс. м³. В целом заявленные новые мощности по производству ориентированно-стружечных плит (ОСП) до 2024 г. составляют 3,9 млн м³/год. За период с 2001 по 2016 гг. среднегодовые темпы роста выпуска плит ДСП составили 7,6 %, а плит ОСП – 19,1 % [1 – 4], что говорит об интенсивном развитии производства древесных плит.

Увеличение объемов производства древесных плит сопровождалось расширением их ассортимента. В больших объемах изготавливаются ДСП с улучшенными и специальными свойствами, такими как ДСП общего назначения типа Р2 пониженной токсичности класса эмиссии формальдегида Е0,5 [5, 6] и влагостойкие ДСП типа Р3, Р5, Р7 [5, 7]. Для их производства активно используются меламинакарбамидоформальдегидные смолы (МКФС).

Подобное увеличение спроса связано с широким развитием строительной отрасли и производства мебели, в которых используются ОСП, фанера и т.д.

По отношению к другим древесным пропиточным смолам, например, карбамидоформальдегидным смолам (КФС), МКФС обеспечивают повышенную влаго- и атмосферную стойкость, но имеют довольно низкую скорость отверждения на стадии горячего прессования плит, что снижает производительность [8].

Следовательно, проблемы медленной поликонденсации смол МКФС являются достаточно актуальными для предприятий деревообрабатывающей отрасли.

Подбор отвердителя

Сегодня на большинстве предприятий в качестве стандартных отвердителей применяется хлорид аммония NH_4Cl или сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, однако эффективность данных отвердителей невысокая, также наблюдаются экологические проблемы при их применении [2, 9, 10].

Представленный в исследовании отвердитель рекомендован для применения вместо стандартных отвердителей, добавляемых на производстве древесностружечных плит перед отверждением, вместо стандартных отвердителей NH_4Cl или $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Реакция образования оксалата мочевины представлена на рис. 1.

Образование оксалата мочевины происходит за счет взаимодействия с одной карбоксильной группой щавелевой кислоты, так как мочевина является слабым основанием и может взаимодействовать лишь с одним эквивалентом кислоты.

Предположительный механизм действия добавки основан на анализе строения молекул мономеров карбамидомеламинаформальдегидной смолы КМФ-К. Для щавелевой кислоты константы диссоциации по 1-й и 2-й ступеням соответственно равны $K_1 = 5,62 \cdot 10^{-2}$ и $K_2 = 5,37 \cdot 10^{-5}$ [11].

Щавелевая кислота является одной из сильнейших органических кислот, поэтому, несмотря на ее плохую растворимость, даже малые концентрации будут приводить к резкому снижению pH, и затем к нарушению сроков хранения КМФ смолы. При переводе щавелевой кислоты мочевиной в форму оксалата ее карбоксильная группа инактивируется молекулой мочевины и резкого падения pH не происходит. Присоединенная молекула мочевины также оказывает положительное влияние на реологические характеристики смолы, в результате взаимодействия функциональной группы мочевины и мономера КМФ смолы усиливается пластифицирующее действие, что приводит к сохранению оптимальной текучести смолы с отвердителем в течение времени. При температурном отверждении происходит растворение остатка оксалата и выделяется кислота за счет гидролиза его молекулы, по аналогии с моноуреидом фталевой кислоты [12, 13], щавелевая кислота за счет своей силы резко понижает pH и увеличивает скорость реакции поликонденсации олигомеров. Оксалат мочевины $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_6$ применяют в качестве вспенивающего агента. Данное свойство полезно при производстве древесностружечных плит, так как увеличивает удельную поверхность контакта смолы со стружками и прочность склеенных плит. Второй компонент композиционной добавки – персульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, который является латентным катализатором отверждения, взаимодействующим с выделяющимся формальдегидом с образованием муравьиной кислоты. Данный компонент выбран из-за наиболее высокого показателя кислотности его кислотного остатка, следовательно, диссоциация происходит более полно, и по закону Гульдберга–Вааге возрастает концентрация вещества, взаимодействующего с формальдегидом подобно реакции на рис. 2 [14].

Предположительный механизм реакций поликонденсации олигомеров представлен на рис. 3, а, б [15 – 18].

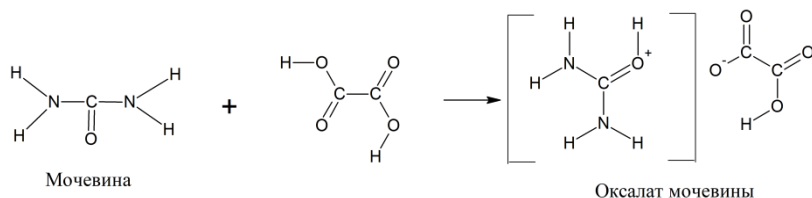


Рис. 1. Реакция получения оксалата мочевины

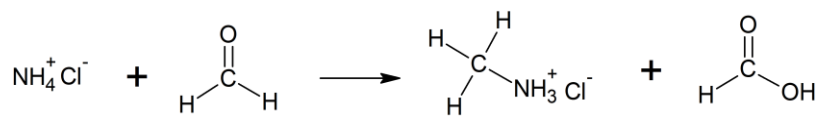


Рис. 2. Взаимодействие хлорида аммония с формальдегидом

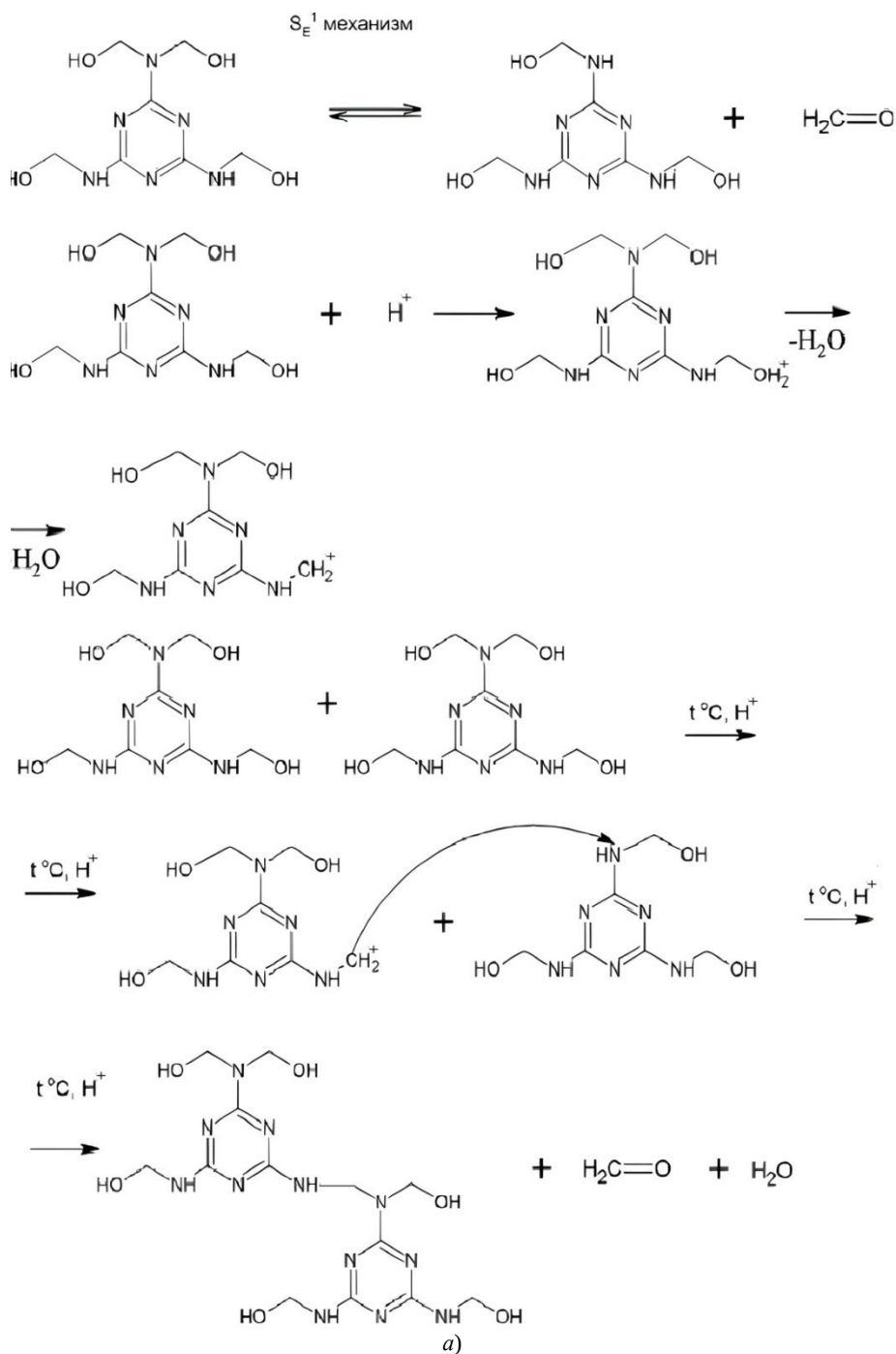


Рис. 3. Реакция поликонденсации по электрофильному механизму (*а*) и бимолекулярного нуклеофильного замещения (*б*) (начало)

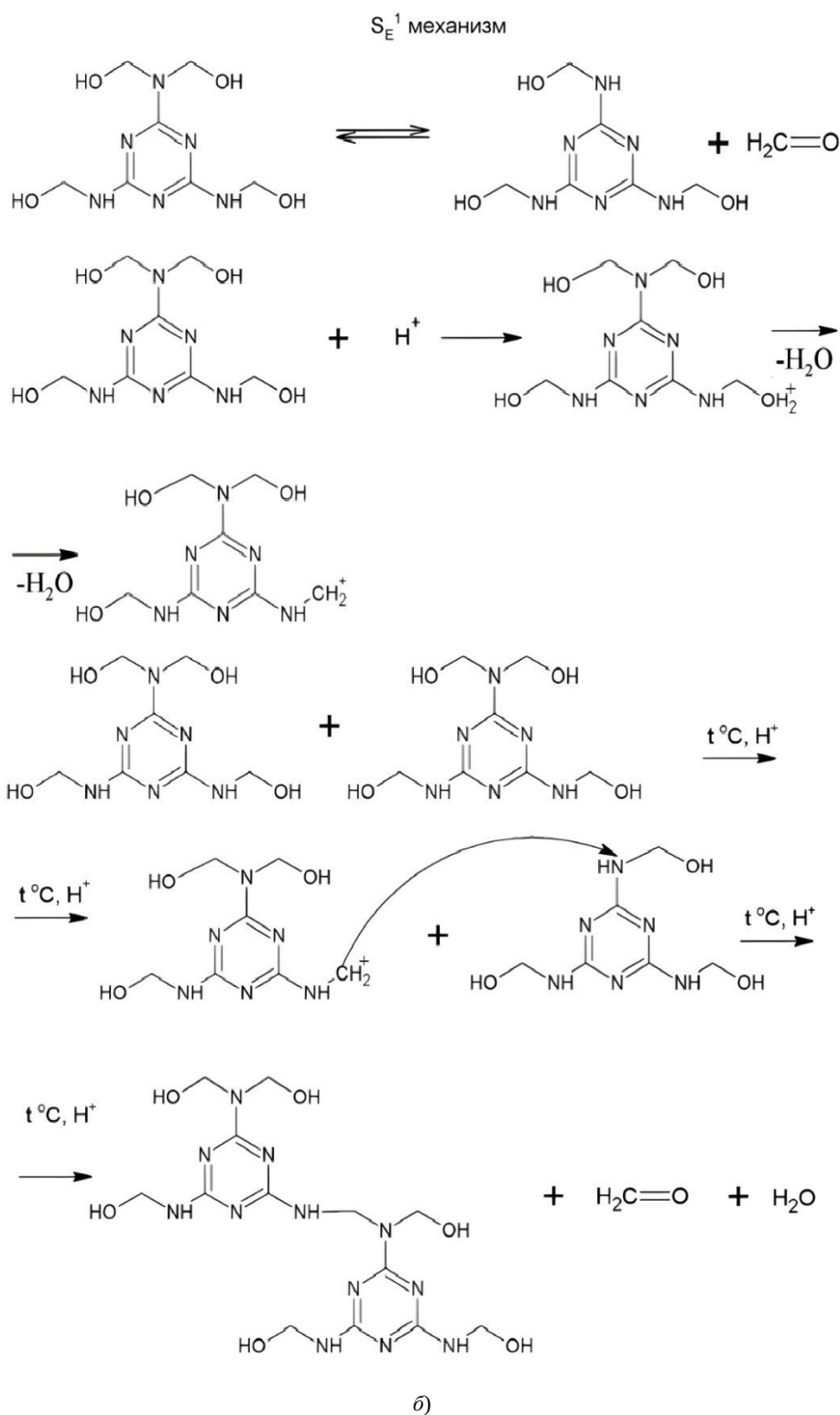


Рис. 3. Окончание

Для приготовления добавки оксалата мочевины использовали реакцию между 20%-м насыщенным раствором щавелевой кислоты, который готовят при температуре 45 °С, и 40%-м водным раствором мочевины при температуре 25 °С. В результате взаимодействия образуется плохо растворимый в воде осадок, отделяемый фильтрованием, вследствие его сжимаемости. Одним из преимуществ данной добавки является доступное и недорогое сырье для ее получения.

Исследования проводились по методике полного двухфакторного двухуровневого эксперимента 2² [19, 20]. После получения данных проведен глубокий регрессионный анализ, и получена зависимость времени желатинизации от влияния двух факторов (веществ). Анализ экспериментальных данных, представленных в табл. 1, и расчет проводились с использованием программной среды Maple 14 [21]. Графики зависимостей времени желатинизации от концентраций компонентов представлены на рис. 4. Зависимости точно отражают реальный процесс, что подтверждается рассчитанным значением критерия Фишера, стандартное отклонение составляет 1,29. Проведя оценку значимости коэффициентов регрессии, сделаны выводы, что коэффициент, который характеризует взаимное влияние факторов (концентраций веществ) свойства продукта, незначителен. Следовательно, добавки действуют независимо друг от друга, и усиления или ослабления действия веществ по суперпозиционному или синергетическому закону не происходит.

Таблица 1

Зависимость между входными параметрами и значениями отклика

Номер состава	Массовые доли веществ, %		рН	Время желатинизации, с			
				Номер эксперимента			Среднее значение
	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	C ₄ H ₁₀ N ₄ O ₆		1	2	3	
I	1	1	7	75	74	74	74,3
II	2	2	6	52	51	53	52
III	1,5	1,5	6	67	64	63	64,67
IV	1	2	6	68	65	63	65,33
V	2	1	6.5	64	61	60	61,67

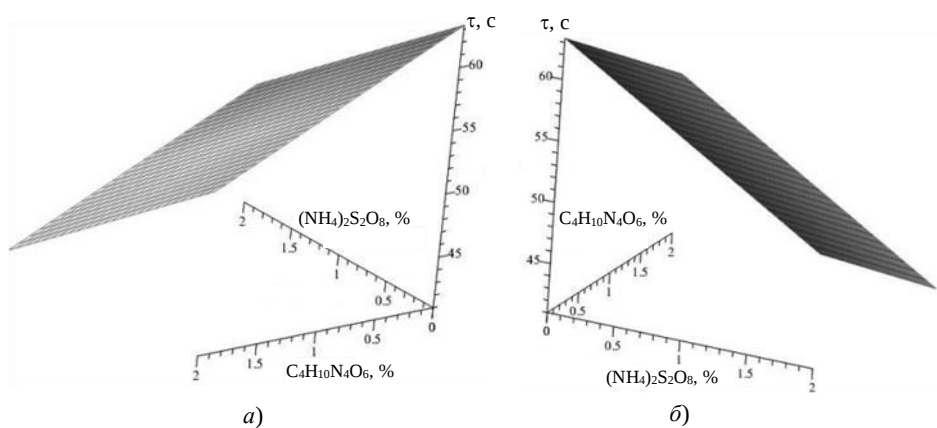


Рис. 4. Зависимости времени желатинизации от концентрации компонента персульфата аммония: а – оксалата мочевины, б – персульфата аммония

Заключение

Персульфат аммония работает за счет реакции с формальдегидом как латентный катализатор. Оксалат мочевины действует за счет прямого снижения pH.

Параметр условной вязкости сохраняется в пределах нормы несколько часов, поэтому данная добавка рекомендована к использованию непосредственно перед применением, так как в течение этого времени смола имеет удовлетворительную вязкость при снижении времени желатинизации на 25 с.

Исследуя данные построенных зависимостей и эксперимента, для использования рекомендована добавка состава V, которая содержит 2 масс. ед. персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 1 масс. ед. оксалата мочевины $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_6$. Также возможно применение добавки состава II с содержанием 2-х масс. ед. $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ и 2-х масс. ед. оксалата мочевины.

Список литературы

1. Соколова, Е. Г. Склеивание шпона при изготовлении низкотоксичной фанеры с применением клеев на основе карбамидомеламинаформальдегидных смол: дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Соколова Екатерина Геннадьевна. – Санкт-Петербург, 2011. – 150 с.
2. Меркулова, А. Ф. Применение композиционных отвердителей для ускорения процесса поликонденсации меламинакарбамидоформальдегидных смол / А. Ф. Меркулова, В. В. Васильев, С. Н. Вьюнков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – № 3. – С. 300 – 306.
3. Разработка технологии модификации карбамидоформальдегидных смол / Д. А. Перминова, В. С. Мальков, А. С. Князев, Э. М. Дахнави // Вестник технологического университета. – 2015. – №1. – С. 159 – 162.
4. Шалашов, А. П. Состояние и перспективы развития производства древесных плит в России / А. П. Шалашов // Древесные плиты: теория и практика: материалы 20-й Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 15–16 марта 2017 года) ; под ред. А.А. Леоновича. – СПб., 2017. – С. 6 – 11.
5. Связующие вещества в производстве OSB плит. Статьи компании «Мерани» 20.02.2016. – Текст: электронный. – URL: <https://www.merani.ru/press-tsentr/stati/1089/> (дата обращения: 01.06.2023).
6. ГОСТ 10632–2014. Плиты древесно-стружечные. Технические условия. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110850> (дата обращения: 01.06.2023).
7. ГОСТ 32399–2013. Плиты древесно-стружечные влагостойкие. Технические условия. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107385> (дата обращения: 01.06.2023).
8. Пластификатор для полиэфирных смол – ортофталевая кислота. – Текст: электронный. – URL: https://www.polypark.ru/catalog/polyester-resins/category_plastifikator/ (дата обращения: 01.06.2023).
9. Влияние модификаторов на время отверждения фенолформальдегидного связующего для прессования фанеры при низкотемпературном режиме / Т. Н. Вахнина, А. А. Титунин, А. А. Федотов, И. В. Сусоева. // Лесотехнический журнал. – 2019. – № 4 – С. 99 – 108.
10. Варанкина, Г. С. Склеивание фанеры модифицированными клеями / Г. С. Варанкина, Д. С. Русаков, А. Н. Чубинский // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 4. – С. 133 – 137.
11. Константы диссоциации некоторых кислот и оснований. – Текст: электронный. – URL: https://www.chemequ.ru/справочники/константы_диссоциации_кислот/ (дата обращения: 01.06.2023).

12. China Urea Formaldehyde Resin. – Текст: электронный. – URL: <https://www.huafumelamine.com/ru/china-urea-formaldehyde-resin/> (дата обращения: 01.06.2023).
13. Доронин, Ю. Г. Синтетические смолы в деревообработке : справочник / Ю. Г. Доронин, М. М. Свиткина, С. Н. Мирошниченко. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 220 с.
14. Виршпа, З. Аминопласты / З. Виршпа, Я. Бжезиньский ; пер. с польск. И. В. Холодовой. – М. : Химия, 1973. – 343 с.
15. Карбамидо-формальдегидные меламина-формальдегидные смолы. – Текст: электронный. – URL: <https://chem21.info/info/309288/> (дата обращения: 01.06.2023).
16. Механизм получения меламинаформальдегидных и карбамидомеламиноформальдегидных смол. – Текст: электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanizm-polucheniya-melaminoformaldegidnyh-i-karbamidomelaminoformaldegidnyh-smol> (дата обращения: 01.06.2023).
17. Механизмы реакций нуклеофильного замещения, Бимолекулярное нуклеофильное замещение SN2 – Органическая химия. – Текст: электронный. – URL: https://studref.com/539614/matematika_himiya_fizik/mechanizmy_reaktsiy_nukleofilno-go_zamescheniya (дата обращения: 01.06.2023).
18. Фенолформальдегидные смолы : Химия онлайн. – Текст: электронный. – URL: <https://himiya-online.ru/organicheskaya-ximiya/fenol/fenolformaldegidnye-smoly.html> (дата обращения: 01.06.2023).
19. Конопленко, Е. И. Планирование эксперимента: методические указания для студентов / Е. И. Конопленко, Н. К. Хореева, А. П. Лапуть. – М. : МГУПП, 2011. – 41 с.
20. Кузнецова, Е. В. Математическое планирование эксперимента : учебно-метод. пособие / Е. В. Кузнецова. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с.
21. Maple Essentials On-line Tour. – Текст: электронный. – URL: <http://old.exponenta.ru/soft/Maple/tour/3/3.asp> (дата обращения: 01.06.2023).

Development of a Complex Catalyst to Accelerate the Curing of Urea Melamine Formaldehyde Resin

A. M. Istomin^{1✉}, E. S. Bakunin¹, A. V. Rukhov¹,
V. I. Istomina², I. A. Zhabkina¹, M. S. Goncharova¹

*Departments: “Chemistry and Chemical Technologies”, andrewerer@mail.ru (1);
“Technologies and Equipment for Food and Chemical Production”,
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: gelatinization time; urea-melamine-formaldehyde resin; hardeners; polycondensation.

Abstract: A composite (complex) hardener based on urea oxalate and ammonium peroxodisulfate has been developed to accelerate the polycondensation reaction of oligomer chains of urea-melamine-formaldehyde resins, as well as to reduce the gelatinization (curing) time of binder adhesive compositions in the production of wood-based materials. The formulation of the additive, possible mechanisms of reactions of polycondensation of oligomers and the production of a hardener are presented. The mechanism of action of the additive and its influence on the general technical characteristics of the resin are considered. The dependence of the resin gelatinization time on the hardener content is given.

References

1. Sokolova E.G. *PhD of Candidate's thesis (Eng.)*, St. Petersburg, 2011, 150 p. (In Russ.)
2. Merkulova A.F., Vasilev V.V., Vyunkov S.N. [Application of composite hardeners for speed up the polycondensation process urea-melamine-formaldehyde resins], *Aktualnye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: science and practice], 2018, no. 3, pp. 300-306. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Perminova D.A., Malkov V.S., Knyazev A.S., Dahnavi E.M. [Development of modification technology urea-melamine-formaldehyde resins], *Vestnik tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, no. 1, pp. 159-162. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Shalashov A.P.; Leonovich A.A. (Ed.). *Trudy 20 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Wood-based panels: theory and practice: Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference], 15-16 March, 2017, St. Petersburg, 2017, pp. 6-11. (In Russ.)
5. <https://www.merani.ru/press-tsentr/stati/1089/> (accessed 01 June 2023).
6. <https://docs.cntd.ru/document/1200110850> (accessed 01 June 2023).
7. <https://docs.cntd.ru/document/1200110850> (accessed 01 June 2023).
8. https://www.polypark.ru/catalog/polyester-resins/category_plastifikator/ (accessed 01 June 2023).
9. Vahnina T.N., Titunin A.A., Fedotov A.A., Susoeva I.V. [Effect of modifiers on curing time phenol-formaldehyde binder for plywood pressing at low temperature], *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest-technical journal], 2019, no. 4, pp. 99-108. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Varankina G.S., Rusakov D.S., Chubinskij A.N. [Bonding plywood with modified adhesives], *Sistemy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technology.], 2015, no.4, pp. 133-137. (In Russ., abstract in Eng.)
11. https://www.chemequ.ru/справочники/константы_диссоциации_кислот/ (accessed 01 June 2023).
12. <https://www.huafumelamine.com/ru/china-urea-formaldehyde-resin/> (accessed 01 June 2023).
13. Doronin Yu.G., Svitkina M.M., Miroshnichenko S.N. *Sinteticheskie smoly v derevoobrabotke: Spravochnik* [Synthetic resins in woodworking. Directory], Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1979, 220 p. (In Russ.)
14. Virshpa Z., Bzhezinskij Ya. *Aminoplasty* [Amino resins], translated by I.V. Holodova, Moscow: Himiya, 1973, 343 p. (In Russ.)
15. <https://chem21.info/info/309288/> (accessed 01 June 2023).
16. <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanizm-polucheniya-melaminoformaldegidnyh-i-karbamidomelaminoformaldegidnyh-smol> (accessed 01 June 2023).
17. https://studref.com/539614/matematika_himiya_fizik/mechanizmy_reaktsiy_nu_kleofilnogo_zamescheniya (accessed 01 June 2023).
18. <https://himija-online.ru/organicheskaya-ximiya/fenol/fenolformaldegidnye-smoly.html> (accessed 01 June 2023).
19. Konoplenko E.I., Horeeva N.K., Lapus' A.P. *Planirovanie eksperimenta: metodicheskie ukazaniya dlya studentov* [Planning an experiment: guidelines for students], Moscow, MGUPP, 2011, 41 p. (In Russ.)
20. Kuznecova E.V. *Matematicheskoe planirovanie eksperimenta: uchebno-metod. posobie* [Mathematical planning of experiment. Educational and methodological manual], Perm', Permskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2011, 35 p. (In Russ.)
21. <http://old.exponenta.ru/soft/Maple/tour/3/3.asp> (accessed 01 June 2023).

Entwicklung eines komplexen Katalysators zur Beschleunigung der Aushärtung von Carbamid-Melamin-Formaldehydharz

Zusammenfassung: Es ist ein zusammengesetzter (komplexer) Härter auf Basis von Harnstoffoxalat und Ammonium-Peroxid-Sulfat entwickelt, um die Polykondensationsreaktion von Oligomerketten von Harnstoff-Melamin-Formaldehydharzen zu beschleunigen und die Gelatinierungszeit (Aushärtungszeit) von Bindemittel-Klebstoffzusammensetzungen bei der Herstellung von Holzwerkstoffen zu verkürzen. Die Formulierung des Additivs, mögliche Reaktionsmechanismen der Polykondensation von Oligomeren und die Herstellung des Härters sind vorgestellt. Es sind der Wirkungsmechanismus des Additivs und sein Einfluss auf die allgemeinen technischen Eigenschaften des Harzes berücksichtigt. Es ist die Zeitabhängigkeit der Verkleisterung des Harzes von dem Härtergehalt gegeben.

Élaboration d'un catalyseur complexe pour accélérer le durcissement de la résine urée mélamine formaldéhyde

Résumé: Est élaboré un durcisseur composite (complexe) à base d'oxalate d'urée et de peroxodisulfate d'ammonium pour accélérer la réaction de polycondensation des chaînes oligomères de résines urée-mélamine-formaldéhyde, ainsi que pour réduire le temps de gélatinisation (durcissement) des compositions adhésives de liant dans la production des matériaux à base de bois. Sont présentés la formulation de l'additif, les mécanismes possibles de réactions de polycondensation d'oligomères et l'obtention d'un durcisseur. Sont considérés le mécanisme d'action de l'additif et son influence sur les caractéristiques techniques générales de la résine. Est donnée la dépendance temporelle gélatinisation de la résine à partir du contenu du durcisseur.

Авторы: *Истомин Андрей Михайлович* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии»; *Бакунин Евгений Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Рухов Артем Викторович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии»; *Истомина Валерия Игоревна* – студент; *Жабкина Инна Александровна* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии»; *Гончарова Мария Сергеевна* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТУПЕНЧАТОГО ПОНИЖЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОЭКСТРАКЦИИ МЕДИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

М. Н. Бобров✉, Е. С. Печенкина

*Кафедра «Технологии электрохимических производств»,
mikh-bobrov@ya.ru; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)»,
Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: азотнокислые и сернокислые электролиты; математическая модель эксперимента; получение компактной меди; электролиз на истощение электролита.

Аннотация: Обобщены литературные данные по переработке отходов с получением компактного осадка меди методом электролиза. Предложена и экспериментально подтверждена математическая модель электроэкстракции меди из азотнокислого и сульфатного электролитов с понижением рабочей плотности тока по мере истощения электролита. Разработанные модели электролиза опробованы в процессах технологической переработки концентрированных медьсодержащих отходов с получением осадка компактной меди высокой чистоты.

Введение

Выделение и повторное использование определенных материалов и целевых продуктов из промышленных отходов приобретает все большее значение. В силу развития промышленного производства проблема переработки отходов, содержащих цветные металлы (цинк, никель, медь и др.), является достаточно актуальной. Ужесточение норм законодательства в сфере охраны окружающей среды и рационального природопользования вынуждает многие предприятия брать на себя тенденции на сокращение объема образующихся отходов промышленных производств и их переработку в целях вторичного использования, а также непосредственный возврат ценных компонентов в конкретный технологический цикл путем организации локальных схем переработки. В то же время данные Министерства природных ресурсов и экологии РФ за 2022 год указывают на восстановление тренда на увеличение объема захороненных отходов [1].

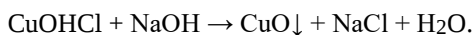
Использование электрохимических экстракционных методов с получением целевых продуктов достаточно широко применимо к комплексной переработке многокомпонентного вторичного сырья и утилизации отходов предприятий добывающей и перерабатывающей промышленности [2 – 4].

Тем не менее в вопросе применимости электроэкстракции зачастую ключевым аспектом является полнота извлечения ценного компонента в виде определенного товарного продукта. В частности, большинство применяемых схем по извлечению меди с получением металлического осадка в компактном виде ограничено диапазоном применяемых плотностей тока в зависимости от концентрации ионов меди в начале и конце процесса электролиза.

Цель работы – изучение возможности глубокой электроэкстракции меди из различных типов электролитов при ступенчатом понижении плотности тока согласно предложенной математической модели и применимости ее к переработке медьсодержащих концентрированных отходов.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Получение компактного осадка меди с использованием метода электроэкстракции применимо к переработке шламов, образующихся при травлении печатных плат в медноаммиачных травильных растворах, обоснование и описание технологии которой приведено в [5]. Сущность разработанной технологии извлечения меди из шлама заключается в термическом разложении шлама в щелочной среде (75...80 °C, pH 12,5...13,0) по реакциям:



Отмытый и высушенный осадок оксида меди (II), растворенный в серной кислоте с концентрацией 100 г/л, служит электролитом при электроэкстракции меди. Образующаяся на нерастворимом аноде (свинец или его сплав) кислота используется для растворения новых порций оксида меди (II). Поскольку при электроэкстракции из непроточного электролита концентрация ионов меди уменьшается, возникает опасность образования вместо компактного осадка меди губчатых или порошкообразных осадков.

Для более глубокого извлечения меди за один электролиз необходимо понижать величину рабочей плотности тока по определенному закону. Для расчета кривой изменения плотности тока во времени приняты следующие исходные положения.

В каждый момент времени t рабочая плотность тока $i(t)$, А/дм², пропорциональна концентрации C_{Cu} меди, г/дм³, в электролите. Таким образом,

$$i(t) = k C_{\text{Cu}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, А·дм/г.

Коэффициент пропорциональности k определяется как некоторое среднее значение на основе литературных данных по промышленному электролизу меди из сульфатных электролитов и в математических расчетах принято равным 0,05 [2].

Концентрация меди C_{Cu} в каждый момент времени t равна

$$C_{\text{Cu}} = C_0 - \Delta m/V, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация, г/дм³; V – объем электролита, дм³; Δm – масса меди, выделившейся на катоде за время t , г.

Величина Δm определяется из соотношения

$$\Delta m = q i_{\text{cp}} S t \text{BT}, \quad (3)$$

где q – электрохимический эквивалент меди, $q = 1,186$ г/(А·ч); S – рабочая поверхность катода, дм²; i_{cp} – средняя плотность тока за время t , А/дм²; BT – выход по току, BT = 0,95.

Из вышеприведенных зависимостей (1) – (3) получаем

$$i(t) = k \left(C_0 - q \text{ ВТ} \frac{S}{V} i_{\text{cp}} t \right) = k C_0 - k q \text{ ВТ} \frac{S}{V} \int_0^t i(\tau) d\tau = a - b \int_0^t i(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $a = k C_0$, $b = k q \text{ ВТ} \frac{S}{V}$.

Для решения интегрального уравнения (4) применим преобразование Лапласа, где $i(t) \equiv I(p)$. При этом учитываем, что операции интегрирования оригинала соответствует алгебраическое действие над изображением, а именно его деление на p :

$$\int_0^t i(\tau) d\tau = \frac{I(p)}{p}.$$

Применив преобразование Лапласа к обеим частям выражения (4), получим:

$$I(p) = \frac{a}{p} - b \frac{I(p)}{p}; \quad I(p) = \frac{a}{p + b},$$

откуда

$$i(t) = a e^{-bt}. \quad (5)$$

Этот же результат может быть получен приведением выражения (4) к дифференциальному уравнению. Дифференцируем левую и правую части выражения (4)

$$i' = -bi(t),$$

где $i(0) = a$;

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} = -bi; \quad \int \frac{di}{i} = -b dt; \quad \ln i = -b + \ln C; \\ i(t) = C e^{-bt}, \end{aligned} \quad (6)$$

поскольку $i(0) = a$, то $C = a$.

Степень извлечения меди из электролита за время t равна

$$\eta = \frac{i(0) - i(t)}{i(0)} = 1 - e^{-bt}. \quad (7)$$

Время достижения определенной степени извлечения меди

$$t = -\frac{1}{b} \ln(1 - \eta). \quad (8)$$

С учетом выведенных зависимостей в редакторе Excel выполнены расчеты для выбора режима электролиза. При выполнении расчетов для рабочей плотности тока задавался шаг по времени, равный одной минуте; при выполнении расчетов t задавался шаг по степени извлечения меди, равный 0,01.

Расчетные зависимости изменения плотности тока во времени (для различной плотности загрузки катодов S/V , дм^{-1}) представлены на рис. 1, а. Расчеты завершались при достижении степени извлечения меди, равной 75 % (0,75). При этом конечное значение плотности тока составляло 25 % от начального. Расчет выполнен для электролита с начальной концентрацией меди $C_0 = 60 \text{ г/дм}^3$. Значение b в уравнениях при принятых исходных данных, согласно (4), равно $0,05635S/V$.

Расчетные зависимости времени электроэкстракции от предполагаемой степени извлечения меди (для различной плотности загрузки катодов) представлены на рис. 1, б, и выполнены для электролита с начальной концентрацией меди $C_0 = 60 \text{ г/дм}^3$. Расчеты завершались при достижении степени извлечения меди, равной 95 % (0,95).

Из полученных данных следует, что при $\eta > 0,75 \dots 0,8$ время электроэкстракции существенно возрастает. В условиях малотоннажного производства целесообразно электроэкстракцию проводить за время не более 5...7 ч. Данному условию соответствуют значения $S/V > 4 \text{ дм}^{-1}$ (см. рис. 1).

Казалось бы, чем больше соотношение S/V , тем лучше и быстрее проходит электроэкстракция. Однако сильно увеличивать данное соотношение нельзя. При плотной сборке электродов (вплотную ко дну и стенкам электролизера) обратная величина V/S будет равна межэлектродному расстоянию. Так, для $S/V = 5 \text{ дм}^{-1}$ межэлектродное расстояние (обозначим его L) будет равно $1/5 \text{ дм}$ (2 см). При дальнейшем увеличении S/V величина L будет еще меньше, и возникнет опасность коротких замыканий между электродами. Поэтому следует рекомендовать значения S/V в пределах от 4 до 5 дм^{-1} .

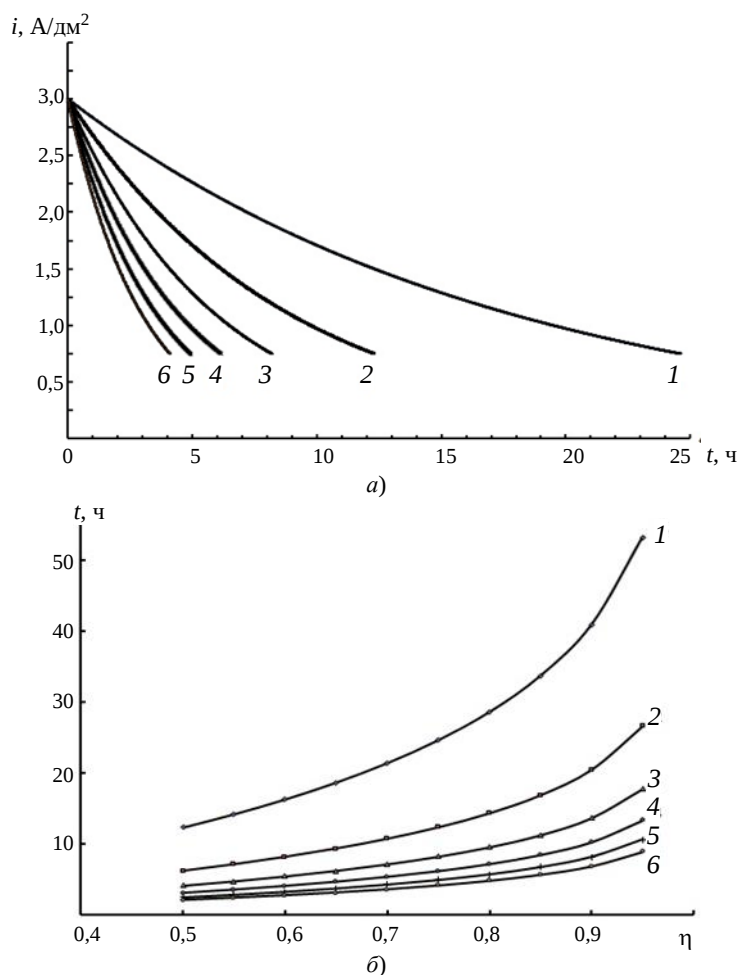


Рис. 1. Расчетные зависимости изменения плотности тока во времени (а) и времени электроэкстракции от предполагаемой степени извлечения меди (б): номер кривой соответствует величине S/V , дм^{-1}

При реальном осуществлении электролиза должно быть определенное расстояние от края электрода до дна и стенок, что соответствует ситуации, когда при одном и том же межэлектродном расстоянии L соотношение S/V будет снижаться. Уменьшение соотношения S/V равносильно (при $L = \text{const}$) введению избытка электролита по сравнению с плотной сборкой электродов. По этой причине проведены расчеты времени электролиза для следующих условий: $C_0 = 60$ г/л, $\eta = 0,75$; избыток электролита – 5 – 20 % по сравнению с плотной сборкой. При выполнении этих расчетов определялись S/V , новые значения b . Из полученных расчетных данных следует, что даже при 20%-м избытке электролита время электролиза не превышает 7,5 ч, что укладывается во время одной рабочей смены.

С учетом вышеизложенного проведены две серии опытов по электролизу модельных растворов и растворов, полученных при переработке шлама одного из промышленных предприятий по производству печатных плат. В обеих сериях расчетное извлечение меди при каждом электролизе составляло 75 %, а количество циклов «электролиз – растворение CuO » – 6. Расчетная зависимость $I - t$ аппроксимирована ступенчатым понижением силы тока, представленным на рис. 2.

В обеих сериях опытов получены компактные качественные осадки меди с ВТ, равным 94 – 95,2 %. Процентное содержание меди по результатам спектрального анализа, выполненного на спектрометре SPECTROLAB, составило 99,99 % в обоих образцах, что соответствует марке катодной меди М0к по ГОСТ 859–2014 и дает возможность использования полученного осадка в качестве анодов при гальваническом меднении.

Стоит отметить, что практика применения электролиза меди с получением компактных осадков из азотнокислых (нитратных) растворов встречается в литературных источниках крайне редко. В частности, в [6] определены оптимальные параметры и показатели процесса электроэкстракции меди из сульфатно-нитратных растворов, полученных при азотнокислотном выщелачивании полиметаллического сульфидного сырья и показано, что увеличение концентрации азотной кислоты в электролите не оказывает значительного влияния на показатели процесса. Авторами [7] предложена технология очистки нитратного медьсодержащего раствора травления с использованием импульсного электролиза и изучено влияние времени импульса на эффективность очистки и ВТ меди.

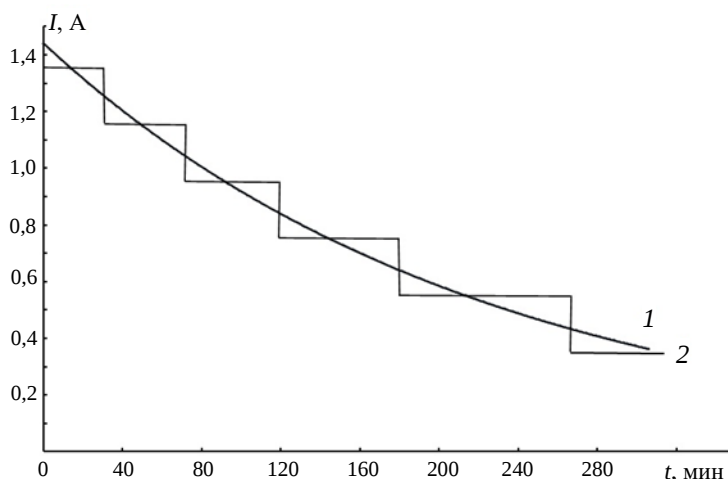
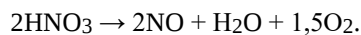
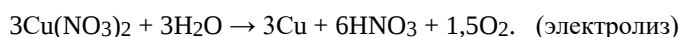
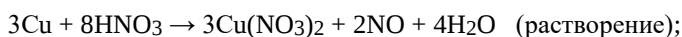


Рис. 2. Изменение тока при электролизе:

1 – расчетная кривая; 2 – ступенчатое изменение тока: $C_0 = 60$ г/дм³, $S/V = 4,8$ дм⁻¹

В работе [8] предложена технологическая схема переработки медьсодержащего ядохимиката купрозана через промежуточную стадию цементации меди в виде порошка из раствора купрозана в серной кислоте. Полученную на стадии цементации медь использовали для приготовления медьсодержащего азотнокислого электролита для электроэкстракции меди. При электролизе, в соответствии с литературными данными [9], по получению меди из нитратных электролитов концентрация азотной кислоты не должна превышать 63 г/дм³.

В случае электроэкстракции из нитратного электролита регенерированной при электролизе азотной кислоты недостаточно для растворения новых количеств меди. Это объясняется тем, что при растворении меди часть азотной кислоты расходуется на образование оксида азота (II). В итоге цикл «растворение – электролиз» описывается уравнениями:



В соответствии с реакцией при электролизе наработка азотной кислоты идет в два раза быстрее истощения электролита по меди. Изменение концентраций меди и азотной кислоты происходит согласно уравнениям (для упрощения анодный и катодный ВТ приняты 100 %):

$$C_{\text{Cu}} = C_{\text{Cu},0} - q_{\text{Cu}} \frac{Q}{V}; \quad (9)$$

$$C_{\text{HNO}_3} = C_{\text{HNO}_3,0} - q_{\text{HNO}_3} \frac{Q}{V}, \quad (10)$$

где q – электрохимический эквивалент, г/(А·ч); Q – количество пропущенного электричества, А·ч; V – объем электролита, г/дм³; $C_{\text{Cu},0}$ и $C_{\text{HNO}_3,0}$ – концентрации соответственно меди и азотной кислоты в начале электролиза.

Степень извлечения η меди за одну электроэкстракцию составляет

$$\eta = \frac{C_{\text{Cu},0} - C_{\text{Cu}}}{C_{\text{Cu},0}} = \frac{q_{\text{Cu}}}{q_{\text{HNO}_3}} \frac{C_{\text{HNO}_3} - C_{\text{HNO}_3,0}}{C_{\text{Cu},0}}. \quad (11)$$

На рисунке 3 представлено расчетное изменение концентраций меди и азотной кислоты (для $C_{\text{Cu},0} = 60$ г/дм³ и для двух значений $C_{\text{HNO}_3,0} = 0$ и 31,5 г/дм³).

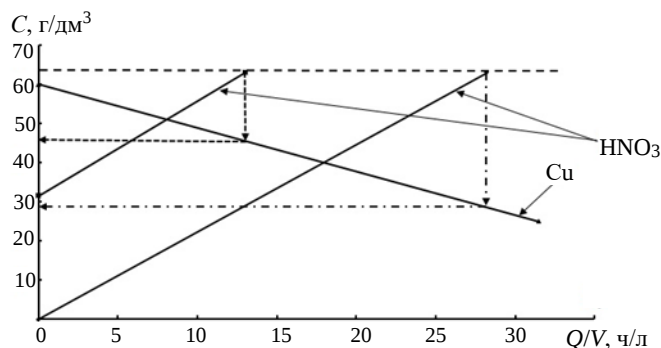


Рис. 3. Расчетное изменение концентрации меди и азотной кислоты при электроэкстракции из азотнокислого(нитратного) электролита

Из расчетов, согласно (9) – (11) и рисунка 3, видно, что при достижении концентрации азотной кислоты 63 г/дм^3 концентрация меди снижается до $28,2 \text{ г/дм}^3$ (степень извлечения 53 %), если электролиз начинается при отсутствии свободной кислоты. Однако на стадии растворения медного порошка конечная концентрация азотной кислоты не может доводиться до нулевого значения; в противном случае растворение медного порошка будет неполным.

В экспериментальной части наработан медный порошок цементацией на алюминиевой стружке, который использовали для приготовления нитратного электролита. С полученным электролитом проведены две серии опытов по электроэкстракции с анодом ОРТА.

В *первой* серии проводили неглубокое (около 20 %) извлечение меди, а отработанный электролит использовали для растворения новых количеств медного порошка (с подпиткой по азотной кислоте). В результате проведенных экспериментов по электроэкстракции получены качественные компактные осадки меди с ВТ, равным 94 – 98 % (при $i = 2 \dots 5 \text{ А/дм}^2$).

Во *второй* серии опытов остаточную кислотность предварительно нейтрализовали раствором гидроксида натрия концентрацией 100 г/дм^3 до pH 4...5. Электролиз проводили с более глубоким истощением по меди (около 50 %). Отработанный электролит также использовали для растворения новых количеств медного порошка (с подпиткой по азотной кислоте); перед электролизом вновь проводили нейтрализацию остаточного количества азотной кислоты раствором гидроксида натрия. В результате этой серии экспериментов (при $i = 2 \text{ А/дм}^2$) также получен качественный компактный осадок с ВТ_{ср} около 98 %. Чистота полученных катодных осадков меди по результатам спектрального анализа с использованием спектрометра SPECTROLAB составила 99,97 %, что позволяет использовать полученный осадок в качестве анодов при гальваническом меднении.

Заключение

Изучена возможность переработки некоторых медьсодержащих концентрированных отходов с использованием метода электроэкстракции для получения в качестве товарного продукта компактного осадка меди высокой чистоты. Предложены способы стабилизации качества получаемого продукта путем применения ступенчатого понижения плотности тока в процессе электроэкстракции на основе разработанной математической модели.

Реализованные схемы электролиза позволяют получать катодные осадки меди с высоким выходом по току и осуществлять переработку отходов с более глубоким извлечением меди из электролитов различного анионного состава.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году : государственный доклад. – М. : Минприроды России ; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с.
2. Ситтиг, М. Извлечение металлов и неорганических соединений из отходов : справочник / М. Ситтиг ; под ред. Н. М. Эмануэля. – М. : Металлургия, 1985. – 408 с.
3. Ильин, В. И. Утилизация отходов промышленного производства электрохимическими и экстракционными методами с получением товарной продукции / В. И. Ильин, М. С. Гречина, А. Ф. Губин // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 10. – С. 42 – 45.
4. Проблемы обезвреживания и утилизации высокотоксичных техногенных промышленных отходов, их переработка с получением ценных компонентов / В. А. Бродский, Д. А. Сахаров, А.В. Колесников [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 4. – С. 88 – 95. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-088-095

5. Утилизация никеля, хрома и меди из некоторых отходов гальванических производств / Ю. П. Хранилов, Л.Л. Лобанова, Т.В. Еремеева, М. Н. Бобров // Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Киров, 2019. – С. 35 – 39.

6. Рогожников, Д. А. Оптимальные параметры электроэкстракции меди из нитратсодержащих растворов / Д. А. Рогожников, С. В. Мамяченков, О. С. Анисимова // *Металлург.* – 2015. – № 8. – С. 75 – 78.

7. Савельева, Е. А. Эффективность очистки медьсодержащих растворов импульсным электролизом / Е. А. Савельева, М. П. Дикун // *Вестник Тамбовского государственного технического университета.* – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 672 – 679. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.672-679

8. Бобров, М. Н. Купрозан как сырьевая база для получения меди в компактном виде / М. Н. Бобров, Ю. П. Хранилов // *Совершенствование технологии гальванических покрытий : тезисы докл. XIV Всерос. совещания, 5 – 8 октября 2009 г., Киров.* – Киров, 2009. – С. 23 – 25.

9. Справочник по электрохимии / Р. К. Астахова, А. А. Белюстин, В. В. Беренблит [и др.] ; под ред. А. М. Сухотина. – Л. : Химия, 1981. – 488 с.

Practical Application of Step Reduction of Current Density in Processes of Electroextraction of Copper during Processing of Copper-Containing Waste

М. N. Bobrov✉, E. S. Pechenkina

*Department of Electrochemical Production Technologies, mikh-bobrov@ya.ru;
St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), St. Petersburg, Russia*

Keywords: nitrate and sulfate electrolytes; mathematical model of the experiment; obtaining compact copper; electrolysis for electrolyte depletion.

Abstract: Literary data on waste recycling are summarized to obtain a compact copper deposit by electrolysis. A mathematical model for the electrical extraction of copper from nitrate and sulfate electrolytes with a decrease in the operating current density as the electrolyte is depleted has been proposed and experimentally confirmed. The developed electrolysis models were tested in the processes of technological processing of concentrated copper-containing waste to obtain a precipitate of compact high-purity copper.

References

1. *O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2022 godu. Gosudarstvennyj doklad* [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2022. State report.]. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2023, 686 p. (In Russ.)

2. Sitting M.; Emanuel N.M. (Ed.). *Izvlechenie metallov i neorganicheskikh soedinenij iz othodov: spravocnik* [Extraction of metals and inorganic compounds from waste: handbook], Moscow: Metallurgy, 1985, 408 p. (In Russ.)

3. Ilyin V.I., Grechina M.S., Gubin A.F. [Utilization of industrial production waste by electrochemical and extraction methods to obtain marketable products], *Himicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2013, no. 10, pp. 42-45. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Brodsky V.A., Sakharov D.A., Kolesnikov A.V., Ashikhmina T.Ya., Ivanov K.N. [Problems of neutralization and utilization of highly toxic technogenic industrial waste, their processing to obtain valuable components], *Teoreticheskaya i prikladnaya*

ekologiya [Theoretical and Applied Ecology], 2022, no. 4, pp. 88-95. doi 10.25750/1995-4301-2022-4-088-095 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Khranilov Yu.P., Lobanova L.L., Ereemeeva T.V., Bobrov M. N. *Utilizatsiya othodov proizvodstva i potrebleniya: innovatsionnye podhody i tekhnologii: materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Utilization of production and consumption waste: innovative approaches and technologies: Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation], Kirov, 2019, pp. 35-39. (In Russ.)

6. Rogozhnikov D.A., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. [Optimal parameters of copper electroextraction from nitrate-containing solutions], *Metallurg* [Metallurg], 2015, no. 8, pp. 75-78. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Savelyeva E.A., Dikun M.P. [Efficiency of purification of copper-containing solutions by pulsed electrolysis], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 672-679. doi 10.17277/vestnik.2017.04.pp.672-679. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Bobrov M.N., Khranilov Yu.P. *Sovershenstvovanie tekhnologii gal'vanicheskikh pokrytij: Tezisy dokladov XIV Vserossiyskogo soveshchaniya, 5-8 oktyabrya 2009, Kirov* [Improvement of electroplating technology: Abstracts of the XIV All-Russian Meeting, October 5-8, 2009, Kirov], Kirov, 2009, pp. 23-25. (In Russ.)

9. Astakhova R.K., Belyustin A.A., Berkinblit V.V.; Sukhotin A.M. (Ed.). *Spravochnik po elektrokhimii* [Handbook of Electrochemistry], Leningrad: Khimiya, 1981, 488 p. (In Russ.)

Praktische Anwendung der Stufenreduzierung der Stromdichte in Prozessen der Elektroextraktion von Kupfer bei der Verarbeitung von kupferhaltigen Abfällen

Zusammenfassung: Es sind literarische Daten zum Abfallrecycling mit der Erhaltung der kompakten Kupferabscheidung durch Elektrolyse zusammengefasst. Ein mathematisches Modell für die elektrische Extraktion von Kupfer aus Nitrat- und Sulfatelektrolyten mit der Abnahme der Betriebsstromdichte bei Erschöpfung des Elektrolyten ist vorgeschlagen und experimentell bestätigt. Die entwickelten Elektrolysemodelle waren in den Prozessen der technologischen Verarbeitung konzentrierter kupferhaltiger Abfälle getestet, um einen Niederschlag aus kompaktem hochreinem Kupfer zu erhalten.

Application pratique de l'étape de réduction de la densité de courant dans les procédés d'électroextraction du cuivre lors du traitement des déchets contenant du cuivre

Résumé: Sont résumées les données littéraires sur le recyclage des déchets pour obtenir un dépôt de cuivre compact par électrolyse. Est proposé et confirmé expérimentalement un modèle mathématique pour l'extraction électrique du cuivre à partir d'électrolytes nitrates et sulfates avec une diminution de la densité de courant de fonctionnement à mesure que l'électrolyte s'épuise. Les modèles d'électrolyse élaborés ont été testés dans les processus de traitement technologique de déchets concentrés contenant du cuivre pour obtenir un précipité de cuivre compact de haute pureté.

Авторы: *Бобров Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии электрохимических производств»; *Печенкина Екатерина Сергеевна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Технологии электрохимических производств», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия.

МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПРИПУСКА НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Н. В. Бондаренко✉, М. В. Соколов

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
nikbon.2015@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: алгоритм; допуск; межоперационные размеры; припуск на механическую обработку деталей.

Аннотация: Решена уточненная задача расчета рационального припуска с использованием среды программирования Python, модернизированы алгоритм и программа для расчета рационального припуска и определения необходимого количества переходов для достижения заданных конструкторской документацией параметров шероховатости поверхности и точности размеров. Дано описание разработанного алгоритма автоматического определения операций и назначения допусков, реализация которого в среде программирования Python позволяет выполнять расчеты для всех операций токарной обработки и подбирать их количество, что существенно упрощает работу технологам на стадии технологической подготовки машиностроительного производства.

Введение

В статье [1] рассмотрена проблема определения припуска, который необходимо снять с заготовки для того, чтобы обеспечить необходимую геометрическую точность детали, а также необходимую чистоту поверхности. Предложен способ ее решения с помощью программы с использованием языка программирования Python, которая позволила бы пользователю выполнить расчет припуска в автоматизированном режиме.

Вопросы обеспечения качества изделий на стадии технологической подготовки производства, рассмотренные при проектировании системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров, изложены в работах [2 – 4].

В данной статье представлен существенно модернизированный алгоритм и программа для ЭВМ на языке Python.

Алгоритм автоматического определения операций на механическую обработку и назначения допусков на межоперационные размеры

На первом этапе модернизации алгоритма решена задача автоматического определения допусков на межоперационные размеры. Нередко для достижения заданной точности поверхности необходимо выполнить несколько операций: черновую, полустовую, чистовую и иногда финишную. При выполнении данных

операций получают межоперационные размеры (за исключением последней операции, на которой выполняется конечный размер детали). Технолог при разработке технологического процесса изготовления детали должен учитывать не только эти размеры, но и отклонения, которые могут возникнуть при их выполнении. Поэтому для этих размеров также необходимо назначать допуски.

Так как для расчета припуска используются параметры уточнения – общее и требуемое, которые напрямую зависят от допусков межоперационных размеров, то правильность подбора операций и их количества напрямую влияет на расчет припуска. Это видно в следующих формулах:

$$\varepsilon_i = T_{i-1}/T_i , \tag{1}$$

где T_{i-1} , T_i – допуски на размер, полученные соответственно на предыдущей и выполняемой технологических операциях;

$$\varepsilon_o = \prod_{i=1}^{i=k} i, \tag{2}$$

где k – число операций;

$$\varepsilon_{т.о} = T_3/T_d , \tag{3}$$

где T_3 , T_d – допуски на размеры соответственно заготовки и детали;

$$\varepsilon_o \geq \varepsilon_{т.о} . \tag{4}$$

Выполнение (4) подтверждает, что выбранных операций и их количества достаточно для достижения требуемой точности.

При разработке технологического процесса технолог может назначать допуски на межоперационные размеры самостоятельно с учетом своего опыта. Но компьютер сделать этого не может, а без этой функции программа может выполнить расчет припуска лишь для одной конкретной операции. Алгоритм назначения допуска позволил бы выполнять расчеты для всех операций и подбирать их количество, что существенно упростило задачу технологам.

На рисунке 1 программа выполняет расчет требуемого уточнения $\varepsilon_{т.о}$, используя данные, введенные пользователем. При этом программа определяет поля допусков размеров детали и заготовки в строках 19 и 26.

Затем выполняется определение качества для указанного диаметра детали (рис. 2).

Числовые значения, с которыми сравнивается параметр T_d , это поля допусков соответствующих качеств, согласно Единой системе допусков и посадок. Таким образом, происходит определение качества для любого заданного размера с любыми отклонениями, указанными пользователем. Когда он определен, можно

```
13 #получаем данные о диаметре, линейном размере, верхнем и нижнем отклонениях диаметра от пользователя:
14 D = float(input("Укажите диаметр детали в мм: "))
15 Vd = float(input("Укажите верхнее отклонение диаметра в мм: "))
16 Nd = float(input("Укажите нижнее отклонение диаметра в мм: "))
17 L = float(input("Укажите длину обрабатываемой поверхности в мм: "))
18 Td = float
19 Td = Vd-Nd
20 print("Допуск на диаметр детали: ", Td, "мм", "\n")
21
22 Z = float(input("Укажите размер заготовки в мм: "))
23 Vz = float(input("Укажите верхнее отклонение размера в мм: "))
24 Nz = float(input("Укажите нижнее отклонение размера в мм: "))
25 Tz = float
26 Tz = Vz-Nz
27 print("Допуск на размер заготовки: ", Tz, "мм", "\n")
28
29 eto = float
30 eto = Tz/Td
31 print("Требуемое уточнение: ", eto, "\n")
```

Рис. 1. Расчет требуемого уточнения

```

37 Kvalitet = int
38
39 if D<1:
40     print("Этот размер невозможно обработать на токарном станке!")
41 else:
42     #определяем качество
43     if 1<D<=3:
44         if Td<0.006:
45             Kvalitet = 5
46             print("Квалитет: ", Kvalitet)
47         elif 0.006<=Td<0.010:
48             Kvalitet = 6
49             print("Квалитет: ", Kvalitet)
50         elif 0.010<=Td<0.014:
51             Kvalitet = 7
52             print("Квалитет: ", Kvalitet)
53         elif 0.014<=Td<0.025:
54             Kvalitet = 8
55             print("Квалитет: ", Kvalitet)
56         elif 0.025<=Td<0.060:
57             Kvalitet = 9
58             print("Квалитет: ", Kvalitet)
59         elif 0.060<=Td<0.100:
60             Kvalitet = 11
61             print("Квалитет: ", Kvalitet)
62         elif 0.100<=Td<0.250:
63             Kvalitet = 12

```

Рис. 2. Определение качества

переходить к определению операций, но прежде необходимо создать переменные, которые будут хранить в себе параметры допусков.

На рисунке 3 показано создание переменных: V_OTKL – переменная, содержащее верхнее отклонение для соответствующей операции; N_OTKL – нижнее отклонение; T_ch, T_p_ch, T_chist – поля допуска для черновой, получистовой и чистовой операций соответственно; ε_ch, ε_poluchern, ε_chist, ε_finish – уточнения для черновой, получистовой, чистовой и финишной операций соответственно. При этом параметр T_finish – переменная, которая хранила бы в себе поле допуска финишной операции – создавать нет смысла, так как на финишной операции обеспечивается размер детали в пределах его поля допуска, то есть Td уже создан в 18 строке (см. рис. 1). Когда программа создала необходимые переменные, она приступает к выполнению алгоритма определения операций и назначения межоперационных допусков.

Рисунок 4 показывает, что созданные ранее переменные приобретают определенные значения с учетом качества размера детали и самого размера. Принцип назначения допусков заключается в следующем правиле: чем точнее конечный размер, тем больше требуется операций и тем точнее допуски на межоперационные размеры. По рассматриваемому алгоритму программа может назначить от

```

450 V_OTKL_chern_oper = float
451 N_OTKL_chern_oper = float
452 V_OTKL_poluchern_oper = float
453 N_OTKL_poluchern_oper = float
454 V_OTKL_chist_oper = float
455 N_OTKL_chist_oper = float
456 V_OTKL_finish_oper = float
457 N_OTKL_finish_oper = float
458
459 T_ch = float
460 T_p_ch = float
461 T_chist = float
462
463 ε_ch = float
464 ε_poluchern = float
465 ε_chist = float
466 ε_finish = float

```

Рис. 3. Создание переменных

одной до четырех операций, а также допуск для каждой операции и сразу выполнить проверку. Результат выполнения алгоритма представлен на рис. 5.

Программа определила качество и выполнила подбор операций, строка с цифрами «20.0 20.0» показывает значения требуемого и общего уточнений, из чего можно сделать вывод об их равенстве. О правильности выбора операций также говорит следующая строка «Операции определены верно». В случае, если бы операции были подобраны с ошибками, программа выведет сообщение: «Неизвестная ошибка!».

```

472 if Kvalitet <= 7:
473     if 1<D<=6:
474         V_OTKL_chern_oper = 0
475         N_OTKL_chern_oper = -0.2
476         T_ch = V_OTKL_chern_oper - N_OTKL_chern_oper
477         V_OTKL_poluchern_oper = 0
478         N_OTKL_poluchern_oper = -0.1
479         T_p_ch = V_OTKL_poluchern_oper - N_OTKL_poluchern_oper
480         V_OTKL_chist_oper = 0
481         N_OTKL_chist_oper = -0.02
482         T_chist = V_OTKL_chist_oper - N_OTKL_chist_oper
483         V_OTKL_finish_oper = Vd
484         N_OTKL_finish_oper = Nd
485         ε_ch = Tz/T_ch
486         ε_poluchern = T_ch/T_p_ch
487         ε_chist = T_p_ch/T_chist
488         ε_finish = T_chist/Td
489         εo = ε_ch*ε_poluchern*ε_chist*ε_finish
490         print(εo, εto)
491         if εo>=εto:
492             this_type_obrabotki = True
493             print("Операции определены верно.")
494             print("Необходимое количество операций: 4.")
495             print("Черновая, получистовая, чистовая, финишная.")
496         else:
497             this_type_obrabotki = False
498             print("Неизвестная ошибка!")

```

Рис. 4. Назначение допусков на межоперационные размеры

```

Укажите диаметр детали в мм: 50
Укажите верхнее отклонение диаметра в мм: 0
Укажите нижнее отклонение диаметра в мм: -0.01
Укажите длину обрабатываемой поверхности в мм: 35
Допуск на диаметр детали: 0.01 мм

Укажите размер заготовки в мм: 75
Укажите верхнее отклонение размера в мм: 0
Укажите нижнее отклонение размера в мм: -0.2
Допуск на размер заготовки: 0.2 мм

Требуемое уточнение: 20.0

-----
Квалитет: 5
Выполняется подбор операций
20.0 20.0
Операции определены верно.
Необходимое количество операций: 4.
Черновая, получистовая, чистовая, финишная.
Определение операций завершено.
-----

```

Рис. 5. Результат работы алгоритма

На рисунке 5 не показаны допуски для операций, но тот факт, что операции были подобраны, говорит о том, что значения допусков уже хранятся в памяти компьютера.

После создания алгоритма автоматического определения операций и назначения допусков появилась возможность реализовать расчет припуска для каждой операции по формулам [5].

После выполнения представленных алгоритмов программа выполняет уже созданный ранее алгоритм для определения шероховатости R_z и глубины дефектного слоя h (рис. 6).

```
ЭТОТ ФАЙЛ.py - C:\Users\Nekk\Desktop\PC\PythonProject\ЭТОТ ФАЙЛ.py (3.8.3)
File Edit Format Run Options Window Help
19 Zagotovka = str(input("Укажите заготовку (прокат, поковка, штамповка, литьё): "))
20 Rz = float
21 h = float
22 if Zagotovka=="прокат":
23     type_of_prokat = str(input("Укажите точность проката (высокая, повышенная, обычная): "))
24     diametr = float(input("Укажите диаметр проката (мм): "))
25     L = float(input("Укажите длину заготовки в мм: "))
26     if type_of_prokat=="высокая":
27         if diametr<=30:
28             print("Rz =",sheet['D6'].value,"мкм;", "h =",sheet['E6'].value, "мкм.")
29             Rz = sheet['D6'].value
30             h = sheet['E6'].value
31         elif 30<diametr<=80:
32             print("Rz =",sheet['D7'].value,"мкм;", "h =",sheet['E7'].value, "мкм.")
33             Rz = sheet['D7'].value
34             h = sheet['E7'].value
35         elif 80<diametr<=180:
36             print("Rz =",sheet['D8'].value,"мкм;", "h =",sheet['E8'].value, "мкм.")
37             Rz = sheet['D8'].value
38             h = sheet['E8'].value
39         elif 180<diametr<=250:
40             print("Rz =",sheet['D9'].value,"мкм;", "h =",sheet['E9'].value, "мкм.")
41             Rz = sheet['D9'].value
42             h = sheet['E9'].value
43         else:
44             print("Введены неверные данные!")
45     elif type_of_prokat=="повышенная":
46         if diametr<=30:
47             print("Rz =",sheet['F6'].value,"мкм;", "h =",sheet['G6'].value, "мкм.")
48             Rz = sheet['F6'].value
49             h = sheet['G6'].value
50         elif 30<diametr<=80:
51             print("Rz =",sheet['F7'].value,"мкм;", "h =",sheet['G7'].value, "мкм.")
52             Rz = sheet['F7'].value
53             h = sheet['G7'].value
54         elif 80<diametr<=180:
55             print("Rz =",sheet['F8'].value,"мкм;", "h =",sheet['G8'].value, "мкм.")
56             Rz = sheet['F8'].value
57             h = sheet['G8'].value
58         elif 180<diametr<=250:
59             print("Rz =",sheet['F9'].value,"мкм;", "h =",sheet['G9'].value, "мкм.")
60             Rz = sheet['F9'].value
61             h = sheet['G9'].value
62         else:
63             print("Введены неверные данные!")
64     elif type_of_prokat=="обычная":
65         if diametr<=30:
66             print("Rz =",sheet['H6'].value,"мкм;", "h =",sheet['I6'].value, "мкм.")
67             Rz = sheet['H6'].value
68             h = sheet['I6'].value
69         elif 30<diametr<=80:
70             print("Rz =",sheet['H7'].value,"мкм;", "h =",sheet['I7'].value, "мкм.")
71             Rz = sheet['H7'].value
72             h = sheet['I7'].value
73         elif 80<diametr<=180:
74             print("Rz =",sheet['H8'].value,"мкм;", "h =",sheet['I8'].value, "мкм.")
75             Rz = sheet['H8'].value
76             h = sheet['I8'].value
77         elif 180<diametr<=250:
78             print("Rz =",sheet['H9'].value,"мкм;", "h =",sheet['I9'].value, "мкм.")
79             Rz = sheet['H9'].value
80             h = sheet['I9'].value
81         else:
82             print("Введены неверные данные!")
83     else:
84         print("Введены неверные данные!")
```

Рис. 6. Определение шероховатости и глубины дефектного слоя заготовки

Но, прежде чем перейти к определению припуска, необходимо уточнить, как заготовка закреплена на станке. Это важно, так как в системе «станок – заготовка – инструмент» возникает много погрешностей, связанных со станком, установленной в нем оснасткой, в которой закреплена заготовка, соответственно возникают погрешности закрепления, а также есть погрешности геометрической формы самой заготовки, и все эти погрешности в итоге оказывают влияние на получаемый на станке размер. Поэтому, когда допуск большой, влияние этих погрешностей будет незначительным, но, когда на станке необходимо обработать размер с точностью до микрометра, эти погрешности необходимо учесть. Числовые значения данных погрешностей известны и представлены в виде таблиц в [5], для использования их в Python они были сохранены в формате .xlsx.

```

1501 #определение пространственных отклонений ( $\Delta$ ) и погрешности установки ( $\varepsilon$ )
1502
1503 if Zagotovka=="прокат":
1504
1505     baza = str(input("укажите, как закреплена заготовка:\n"
1506                      "[1]В патроне, без поджатия задним центром\n"
1507                      "[2]В центрах\n"))
1508
1509     Dk = float
1510     Delta = float
1511     if type_of_prokat == "высокая":
1512         if L < 120:
1513             Dk = sheet['P31'].value
1514             print("Дк = ", sheet['P31'].value, "мм.")
1515         elif 120<L<180:
1516             Dk = sheet['Q31'].value
1517             print("Дк = ", sheet['Q31'].value, "мм.")
1518         elif 180<L<315:
1519             Dk = sheet['R31'].value
1520             print("Дк = ", sheet['R31'].value, "мм.")
1521         elif 315<L<400:
1522             Dk = sheet['S31'].value
1523             print("Дк = ", sheet['S31'].value, "мм.")
1524         elif 400<L<500:
1525             Dk = sheet['T31'].value
1526             print("Дк = ", sheet['T31'].value, "мм.")
1527     elif type_of_prokat == "повышенная":
1528         if L<120:
1529             Dk = sheet['P30'].value
1530             print("Дк = ", sheet['P30'].value, "мм.")
1531         elif 120<L<180:
1532             Dk = sheet['Q30'].value
1533             print("Дк = ", sheet['Q30'].value, "мм.")
1534         elif 180<L<315:
1535             Dk = sheet['R30'].value
1536             print("Дк = ", sheet['R30'].value, "мм.")
1537         elif 315<L<400:
1538             Dk = sheet['S30'].value
1539             print("Дк = ", sheet['S30'].value, "мм.")
1540         elif 400<L<500:
1541             Dk = sheet['T30'].value
1542             print("Дк = ", sheet['T30'].value, "мм.")
1543     elif type_of_prokat == "обычная":
1544         if L<120:
1545             Dk = sheet['P29'].value
1546             print("Дк = ", sheet['P29'].value, "мм.")
1547         elif 120<L<180:
1548             Dk = sheet['Q29'].value
1549             print("Дк = ", sheet['Q29'].value, "мм.")
1550         elif 180<L<315:
1551             Dk = sheet['R29'].value
1552             print("Дк = ", sheet['R29'].value, "мм.")
1553         elif 315<L<400:
1554             Dk = sheet['S29'].value
1555             print("Дк = ", sheet['S29'].value, "мм.")
1556         elif 400<L<500:
1557             Dk = sheet['T29'].value
1558             print("Дк = ", sheet['T29'].value, "мм.")
1559     if baza=="1":
1560         Delta = float = Dk*L
1561          $\varepsilon$  = 0
1562         print("Δ = ", Delta, "мм.")
1563         print("ε = ",  $\varepsilon$ , "мм.")
1564     elif baza=="2":
1565          $\varepsilon$  = 0
1566         Dkor = float = Dk*L
1567         Dc = float = 0.25*(((Vz-Nz)**2)+1)**2)
1568         Delta = float = (((Dkor)**2)+((Dc)**2))**0.5
1569         print("Δ = ", Delta, "мм.")
1570         print("ε = ",  $\varepsilon$ , "мм.")

```

Рис. 7. Определение пространственных отклонений и погрешности поверхностей

На рисунке 7 представлен фрагмент алгоритма для определения отклонений. В качестве заготовки используется прокат, который может быть закреплен в патроне или в центрах. Затем, в зависимости от длины заготовки и точности проката, определяется параметр Δ_k – кривизна профиля сортового проката. В зависимости от способа закрепления заготовки, при необходимости, определяются другие отклонения: $\Delta_{кор}$ – возможное коробление заготовки; Δ_c – ее смещение в закрепляемом приспособлении станка. Так как при использовании центров или трехкулачковых патронов погрешность базирования равна нулю [4, см. табл. 2.34], что также отражено в строках 1560 и 1564, то суммарная погрешность геометрической формы определяется в строках 1559 и 1567 как параметр Delta. По похожей схеме определяются погрешности для других операций и способов закрепления заготовки.

Заключение

Разработан алгоритм назначения допуска, реализация которого в среде программирования Python позволяет выполнять расчеты для всех технологических операций токарной обработки деталей и подбирать их количество, то есть позволяет выбрать от одной до четырех операций, назначить допуск для каждой операции и сразу выполнить проверку соответствия заданной точности размеров детали. Представлен алгоритм для определения отклонений на примере токарной обработки заготовки в виде проката, который может быть закреплен в патроне или в центрах. После этого определение всех необходимых параметров для расчета припуска завершено. Вторым этапом разработки программы будет написание алгоритма, реализуемого в среде программирования Python, для расчета самого припуска.

Список литературы

1. Бондаренко, Н. В. Разработка алгоритма расчета припуска на механическую обработку деталей для среды программирования Python / Н. В. Бондаренко, М. В. Соколов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 674 – 684. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.674-684
2. Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С. И. Пестрецов, К. А. Алтунин, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – М. : Спектр, 2012. – 212 с.
3. Altunin, K. A. Development of Information Support for Intelligent Cad of Cutting Processes / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – No. 2. – P. 67 – 77. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.067-077
4. Алтунин, К. А. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 122 – 133. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.122-133
5. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении / Я. М. Радкевич, В. А. Тимирязев, А. Г. Схиртладзе, М. С. Островский ; под ред. В. А. Тимирязева. – Изд. 2-е, стер. – М. : Высш. школа, 2007. – 272 с.

Modernization of the Algorithm for Calculating Allowance for Mechanical Processing of Parts for the Python Programming Environment

N. V. Bondarenko✉, M. V. Sokolov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
nikbon.2015@yandex.ru, TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: algorithm; admission; interoperational dimensions; allowance for machining parts.

Abstract: The refined problem of calculating a rational allowance using the Python programming environment has been solved, the algorithm and program for calculating the rational allowance and determining the required number of transitions to achieve the parameters of surface roughness and dimensional accuracy specified in the design documentation have been modernized. A description is given of the developed algorithm for automatically determining operations and assigning tolerances, the implementation of which in the Python programming environment allows you to perform calculations for all turning operations and select their quantity, which significantly simplifies the work of technologists at the stage of technological preparation of machine-building production.

References

1. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. [Development of an algorithm for calculating allowance for machining parts for the Python programming environment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 674-684. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.674-684 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Pestretsov S.I., Altunin K.A., Sokolov M.V., Odnol'ko V.G. *Kontseptsiya sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya protsessov rezaniya v tekhnologii mashinostroyeniya* [The concept of creating a system for automated design of cutting processes in mechanical engineering technology], Moscow: Spektr, 2012, 212 p. (In Russ.)
3. Altunin K.A., Sokolov M.V. Development of Information Support for Intelligent Cad of Cutting Processes, *Advanced Materials and Technologies*, 2017, no. 2, pp. 67-77. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.067-077
4. Altunin K.A., Sokolov M.V. [Application of neural networks for modeling the turning process], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 122-133. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.122-133 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Radkevich Ya.M., Timiryazev V.A., Skhirtladze A.G., Ostrovskiy M.S.; Timiryazev V.A. (Ed.). *Raschet pripuskov i mezhperekhodnykh razmerov v mashinostroyenii* [Calculation of allowances and inter-transition dimensions in mechanical engineering], Ed. 2nd, erased, Moscow: Vyssh. shkola, 2007, 272 p. (In Russ.)

Modernisierung des Algorithmus zur Berechnung der Zugaben für die mechanische Bearbeitung von Teilen für die Python-Programmierungsumgebung

Zusammenfassung: Das verfeinerte Problem der Berechnung des rationalen Zuschlags ist mithilfe der Python-Programmierungsumgebung gelöst, modernisiert sind der Algorithmus und das Programm zur Berechnung rationaler Aufmaße und zur

Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Übergängen, um die in der Konstruktionsdokumentation angegebenen Parameter für Oberflächenrauheit und Maßgenauigkeit zu erreichen. Es ist der entwickelte Algorithmus zur automatischen Bestimmung von Vorgängen und Zuweisung von Toleranzen beschrieben, dessen Implementierung in der Python-Programmierungsumgebung es ermöglicht, Berechnungen für alle Drehvorgänge durchzuführen und deren Anzahl auszuwählen, was die Arbeit von Technologen in der Phase der technologischen Vorbereitung der Maschinenbauproduktion erheblich vereinfacht.

Modernisation de l'algorithme de calcul de l'allocation pour le traitement mécanique des pièces pour l'environnement de programmation python

Résumé: Est résolu le problème raffiné du calcul de l'allocation rationnelle en utilisant l'environnement de programmation Python; sont modernisés l'algorithme et le programme permettant de calculer une tolérance rationnelle et de déterminer le nombre requis des transitions pour atteindre les paramètres de rugosité de surface et de précision dimensionnelle spécifiés dans la documentation de conception. Est donnée la description de l'algorithme élaboré pour déterminer automatiquement les opérations et attribuer des tolérances, dont la mise en œuvre dans l'environnement de programmation Python permet d'effectuer des calculs pour toutes les opérations de tournage et de sélectionner leur nombre, ce qui simplifie considérablement le travail des technologues au stade de préparation technologique de la production de construction de machines.

Авторы: *Бондаренко Никита Владимирович* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАМЫ НА ДЕЙСТВИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. Н. Потапов, Н. А. Зямбаев✉

*Кафедра строительного производства и теории сооружений,
ziambaevna@susu.ru; ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия*

Ключевые слова: напряжение; однопролетная балка; рама; пластическая зона; предел текучести; упругопластические деформации.

Аннотация: Разработан аналитический подход к упругопластическому расчету рам на действие горизонтальных сил методом перемещений с линейным упрочнением материала. Для однопролетной статически неопределимой балки введены две упрощающие предпосылки, согласно которым нелинейная область с текучестью волокон разбита на специальные зоны: упругопластическую и пластическую. При моделировании упругопластической зоны зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций подчиняется диаграмме Прандтля, при моделировании пластической зоны (ПЗ) – линейному упрочнению материала. При единичных воздействиях построены эпюры моментов в стандартных статически неопределимых балках, используемые в основной системе метода перемещений. Расчетные усилия балок содержат балочные пластические функции (БПФ), учитывающие влияние ПЗ. Создана расчетная схема нелинейного анализа рам, представляющая пошаговую процедуру последовательных нагружений для уравнений метода перемещений, записанных в приращениях. Нелинейная задача разбита на ряд последовательных линейных задач, решаемых на каждой ступени для фиксированных значений БПФ по схеме упругой задачи. Переход к следующей ступени нагружения сопровождается возрастанием длины ПЗ l_{pi} с последующей корректировкой БПФ. Процесс расчета завершается при условии, когда значения текущей и заданной длин ПЗ становятся равными в пределах погрешности. Рассмотрен пример расчета стальной двухэтажной рамы на горизонтальную нагрузку.

Введение

В последние десятилетия появилось много работ, посвященных изучению напряженно-деформированного состояния каркасных зданий с учетом пластических зон (ПЗ), возникающих в концевых частях ригелей и колонн. Данная проблема особенно актуальна для сейсмических районов, где здания подвергаются значительным динамическим воздействиям. Ввиду сложности моделирования такой задачи подавляющее большинство исследований носит экспериментальный характер.

В научной литературе понятие «пластическая зона» (*Plastic Hinge Length*) впервые введено в работе [1] при расчете железобетонных (ЖБ) сейсмостойких каркасов, где отмечалось, что появление пластических деформаций оказывает положительный эффект в конструкции, вследствие повышения ее деформативно-

сти. Способность нагруженных конструктивных элементов к поглощению и диссипации энергии в целом обеспечивает снижение сейсмического воздействия на каркас. Конструкция, таким образом, помимо своего основного назначения, работает еще как энергопоглотитель.

В ряде работ изучаются вопросы, связанные с параметрами ПЗ, такими как длина зоны l_p , место ее расположения в конструкции, количество ПЗ и др. Большая часть этих исследований посвящена особенностями проектирования ПЗ в железобетоне [2 – 7] и металлических [8 – 12] конструкциях, в основном, применительно к циклическим нагрузкам конструкций, моделирующих сейсмические воздействия. Разработки, связанные с использованием ПЗ, получили закрепление в нормативных документах (кодах) США и других стран [13 – 15].

Для того чтобы преодолеть такие слабые стороны бетонных зданий, как хрупкое разрушение и отсутствие пластичности материала, ведутся разработки для создания новых материалов. В работе [2] показано использование армированного волокнистого цементного композита HPFRCC с повышенной пластичностью материала и высокой способностью к поглощению энергии.

В статье [3] для изгибаемых элементов конструкции проведен численный анализ поведения пластических шарниров с использованием вычислительного программного обеспечения DIANA. Построена калиброванная модель FEM (*Finite Element Method*), исследованы протяженность зоны текучести арматуры, зоны разрушения бетона, зоны локализации кривизны и реальная длина пластического шарнира (ПШ).

В статьях [4 – 7] обсуждались вопросы исследования длины пластического шарнира ЖБ-колонн. В работе [4] для четырех- и семиэтажных плоских каркасов приведены результаты по исследованию в нелинейной версии программы SAP2000 8, где свойства ПШ задаются по умолчанию в соответствии с документом ATC-40 [14]. Пластические зоны определялись на обоих концах балок и колонн. На примере численного эксперимента показано, что длина ПЗ оказывает большое влияние на относительные горизонтальные перемещения верха каркаса и зависит от расчетной формулы для длины l_p . В статье [5] исследована длина ПШ при циклическом и монотонном нагружении ЖБ-колонн на основе 3D-метода конечных элементов. Длины зон ПШ включают зоны текучести арматуры, дробления бетона и эквивалентный ПШ колонн. Показано, что для циклически нагруженных колонн эта длина больше, чем при монотонных нагружениях. Отмечено, что существенное влияние оказывает схема нагружения, определяемая числом циклов, отношение длины колонны к ее ширине и модуль упрочнения арматуры.

В статье [6] рассмотрены аналогичные проблемы, что и в [5], но с учетом использования полимера, усиленного волокном FRP (*Fiber Reinforced Plastic*). Для откалиброванной модели FEM сначала проведены параметрические исследования длины ПШ, затем предложена улучшенная модель для FRP в ЖБ-колоннах. В работе [7] обсуждается проблема назначения длины ПЗ в колонне при циклическом действии боковой силы и осевой нагрузки. Учтено влияние на длину ПЗ геометрических размеров колонны, физико-механических свойств арматуры и бетона, количество и диаметр продольных арматуры и других параметров. Отмечена роль главной арматуры и особенно той ее части, которая деформируется за пределом текучести в области упрочнения.

При проектировании ПЗ в металлических конструкциях в [8] разработан двухузловой суперэлемент с обобщенными ПШ для статического и циклического анализа каркасных конструкций. Используется модель с двумя обобщенными ПШ, расположенными по концам упругого балочного элемента и моделируемыми набором осевых и вращательных упругопластических пружин, воспроизводящих пластические свойства в продольном и угловом направлении элемента. Изме-

ние длины ПШ вдоль продольной оси стержня и угла поворота элемента создает условия для взаимодействия между продольными силами и изгибающими моментами в зоне ПШ. В статье [9] эти идеи использованы при анализе ударной нагрузки.

Для анализа каркасных трубчатых конструкций разработан ряд пластических механизмов, которые позволяют использовать один и тот же циклический формат пластичности [10]. Каждый пластический механизм определен функцией энергии и поверхностью текучести. Это позволяет создавать набор функций, регламентирующий упругие и пластические характеристики модели пластического механизма.

При анализе стальных каркасов, изготовленных по принципу проектирования «сильные колонны – слабые балки», после землетрясения, как отмечено в статье [11], наблюдаются большие зоны текучести и, как следствие, разрушения концов стальных балок. В связи с этим предложено устройство для соединения композитной балки со стальной колонной, включающее демпфер трения. Композитная балка состоит из стальной основы и расположенного в верхней части слоя сверхвысокопрочного бетона (*Ultra High Performance Concrete (UHPC)*). Ожидаемая область ПШ ограничена в пределах допустимого уровня, регламентируемого конструктивными особенностями соединения ($l_p = 120, 240$ мм). Выходная сила, создающая текучесть в композитном UHPC-слое фиксировалась на пяти экспериментальных моделях в момент проскальзывания демпфера трения. Авторами статьи [12] продолжены экспериментальные и аналитические исследования сейсмических характеристик предложенного устройства, в частности, отмечалось устойчивость устройства к повреждениям при длине ПЗ на концах балки, равной $l_p = 120$ мм. Для обозначенной области ПЗ рекомендуется слой UHPC толщиной 100 мм и стальной лист толщиной 20 мм.

Метод исследования

В статье предложен аналитический подход к упругопластическому расчету статически неопределимых рам с линейным упрочнением материала на основе метода перемещений (МП) при статическом действии горизонтальных сил [16], моделирующих сейсмическое воздействие.

Реализация подхода требует решения ряда теоретических проблем:

- разработки модели НДС стержня в зоне упругопластических деформаций на основе введения упрощающих предпосылок;
- выполнения расчетов стандартных статически неопределимых балок на единичные воздействия с учетом специальных зон (ПЗ, упругопластической зоны (УПЗ) и зоны усиления) и построения балочных пластических функций (БПФ);
- построения расчетной схемы нелинейного анализа статически неопределимых рам МП с использованием процедуры метода последовательных нагружений [17].

Для области нелинейных деформаций стержня длиной l с кривой 1 (пунктир) [16], отделяющей упругие деформации от пластических, приняты две предпосылки, по которым данная область разбита на две зоны – УПЗ длиной d и ПЗ длиной l_p (фрагмент стержня с нелинейным участком деформирования показан на рис. 1). Согласно *первой* предпосылке в УПЗ, содержащей малый процент волокон текучести, принят закон деформирования материала по теории идеально-упругопластического тела с переменным модулем упругости E_x . Так как в этом случае кривая 2 имеет вид параболы [18], где $x_1 \in [0, d]$, то величину E_x удобно назначить изменяющейся по квадратичной зависимости, то есть пропорциональной отношению упругого ядра сечения $2y$ к высоте h . По *второй* предпосылке для ПЗ, где преобладает большой процент волокон текучести, напряжения во всей

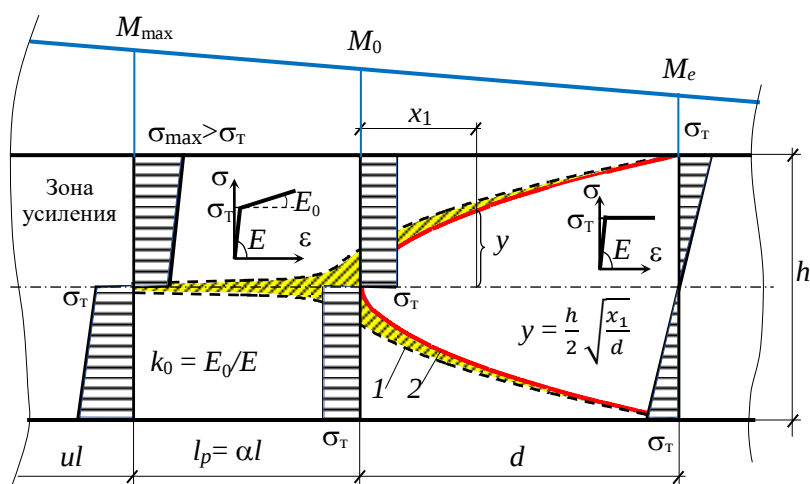


Рис. 1. Преобразование нелинейного участка деформирования стержня в две самостоятельные зоны: УПЗ длиной d и ПЗ длиной l_p

области приняты $\sigma \geq \sigma_T$ с законом деформирования материала по билинейной диаграмме с постоянным модулем упрочнения E_0 . В результате такого моделирования в области, помеченной желтым цветом (см. рис. 1), проведена замена упругих деформаций (с напряжениями $\sigma < \sigma_T$) на пластические.

Кроме того, в целях преобразования ПЗ в зону равного сопротивления закон для момента инерции сечения в ПЗ принят по линейной зависимости, согласованной с характером эпюры моментов.

Результаты и обсуждение

Введенные зависимости для модуля упругости в УПЗ и момента инерции в ПЗ позволили в аналитическом виде выполнить расчеты стандартных балок на единичные воздействия и получить безразмерные БПФ $f_j(\alpha)$, учитывающие поправки к линейному расчету, где $\alpha = l_p/l$ – относительная длина ПЗ, l – длина балки.

В таблице 1 приведены схемы однопролетных статически неопределимых балок с одной пластической зоной и эпюры изгибающих моментов.

Балочные пластические функции, учитывающие влияние пластических зон:

– балочные пластические функции:

$$f_1(\alpha) = \frac{1}{\psi_{11}^0}; \quad f_2(\alpha) = \frac{1}{\Delta}(3\psi_{22} + \psi_{11} - 3\psi_{12});$$

$$f_3(\alpha) = \frac{1}{\Delta}(3\psi_{21} - 2\psi_{11}); \quad f_4(\alpha) = \frac{1}{\Delta}(2\psi_{22} - \psi_{12});$$

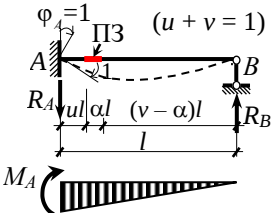
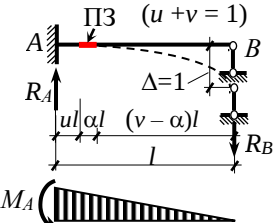
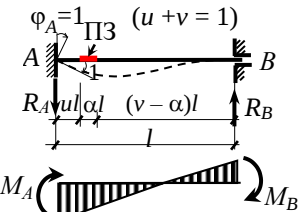
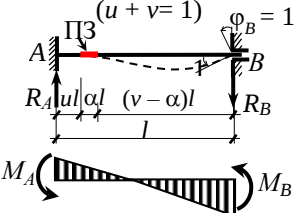
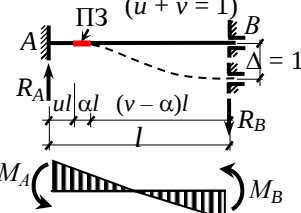
$$f_5(\alpha) = \frac{1}{\Delta}\psi_{12}; \quad f_6(\alpha) = \frac{1}{\Delta}\psi_{11}; \quad f_7(\alpha) = \frac{1}{\Delta}\psi_{22};$$

– вспомогательные нелинейные функции:

$$\psi_{11}^0 = \frac{(1-v^3)}{\xi} + \frac{3\alpha}{k_0}(v-\alpha)\left(v - \frac{\alpha}{2}\right) + (v-\alpha)^3\left[1 + 3m - m^2 + \frac{1}{5}m^3\right];$$

Таблица 1

Расчетные схемы однопролетных статически неопределимых балок
с одной пластической зоной

Расчетные схемы балок и эпюры изгибающих моментов	Расчетные формулы усилий в балках с учетом БПФ
	$M_A = \frac{3EI}{l} f_1(\alpha);$ $R_A = R_B = \frac{3EI}{l^2} f_1(\alpha)$
	$M_A = \frac{3EI}{l^2} f_1(\alpha);$ $R_A = R_B = \frac{3EI}{l^3} f_1(\alpha)$
	$M_A = \frac{4EI}{l} f_2(\alpha);$ $M_B = \frac{2EI}{l} f_3(\alpha);$ $R_A = R_B = \frac{6EI}{l^2} f_4(\alpha)$
	$M_A = \frac{2EI}{l} f_3(\alpha);$ $M_B = \frac{4EI}{l} f_6(\alpha);$ $R_A = R_B = \frac{6EI}{l^2} f_5(\alpha)$
	$M_A = \frac{6EI}{l^2} f_4(\alpha);$ $M_B = \frac{6EI}{l^2} f_5(\alpha);$ $R_A = R_B = \frac{12EI}{l^3} f_7(\alpha)$

$$\begin{aligned}\psi_{11} &= \frac{(1-v^3)}{\xi} + \frac{3(v-\alpha)^3}{8k_0} \left[\frac{1}{2} \mu^2 + 2\mu - 2,5 + \ln \mu \right] + n(v-\alpha)^3 \left[6 - 4n + \frac{6}{5} n^2 \right] + (v-\alpha)^3 (1-n)^3; \\ \psi_{12} &= \psi_{21} = \frac{(1-v^2)}{\xi} + \frac{(v-\alpha)}{k_0} \left[\alpha + \frac{(v-\alpha)}{2} \ln \mu \right] + (v-\alpha)^2 \left(1 + 2n - \frac{1}{3} n^2 \right); \\ \psi_{22} &= \frac{1-v}{\xi} + \frac{(v-\alpha)}{2k_0} \ln \mu + (v-\alpha)(1+n); \end{aligned}$$

$$\Delta = 4\psi_{11}\psi_{22} - 3\psi_{12}\psi_{21},$$

где $\alpha = l_p / l$ – относительная длина ПЗ; $n = m / (1 + M_B / M_0)$; $m = 1 - M_e / M_0$; $k_0 = E_0 / E$; $\mu = (v + \alpha) / (v - \alpha)$; $v = 1 - u$, где $ul \leq 1,5h$ (h – высота поперечного сечения); M_e, M_0 – предельно-упругий и предельный пластический моменты соответственно; M_B – изгибающий момент на правом конце жестко защемленной балки (см. табл. 1); ξ – коэффициент жесткости в зоне усиления.

Далее приведены некоторые свойства и частные случаи функций ψ_{kl} и БПФ $f_j(\alpha)$. Балочные пластические функции учитывают нелинейные свойства системы и зависят от коэффициентов k_0 ($0 < k_0 < 1$), n ($0 \leq n < 1$) и $\xi > 1$. Первые два коэффициента оказывают свое влияние на развитие пластических деформаций в ПЗ (коэффициент k_0) и в УПЗ (коэффициент n); коэффициент ξ обеспечивает безопасный уровень напряжений в зоне усиления.

Вспомогательные функции ψ_{kl} всегда положительны ($\psi_{kl} > 0$) при любых состояниях однопролетных статически неопределимых балок, независимо от наличия / отсутствия тех или иных специальных зон и вида единичного воздействия.

При $\xi = k_0 = 1$ ($\alpha = n = 0$) следует чисто упругое решение, при котором все специальные зоны отсутствуют. В этом случае все вспомогательные функции и БПФ равны единице: $\psi_{kl} = f_j(0) = 1$ ($k, l = 1, 2$; $j = 1, \dots, 7$), и тогда опорные реакции (силы и моменты) будут такими же, как в стандартных балках, используемых в основной системе метода перемещений при упругом расчете.

При $k_0 = 1$ ($\alpha = n = 0$) и $\xi > 1$ в системе отсутствуют пластические деформации. Функции ψ_{kl} сформированы для упругой системы с учетом зон усиления:

$$\psi_{11}^0 = \psi_{11} = \frac{(1-v^3)}{\xi} + v^3; \quad \psi_{12} = \psi_{21} = \frac{(1-v^2)}{\xi} + v^2; \quad \psi_{22} = \frac{(1-v)}{\xi} + v.$$

Такие функции удобно использовать на предварительном этапе нелинейного расчета, когда внешние силы еще не вызывают пластических деформаций.

При $k_0 < 1$, $\alpha = 0$ внешняя нагрузка достигает такого уровня, когда на границе зоны усиления и УПЗ нормальные напряжения становятся равными предельным пластическим напряжениям, то есть пластические деформации уже появились в УПЗ, но ПЗ еще не образовалась ($l_p = 0$). Вспомогательные функции ψ_{kl} имеют вид:

$$\psi_{11}^0 = \frac{(1-v^3)}{\xi} + v^3 \left(1 + 3m - m^2 + \frac{1}{5} m^3 \right);$$

$$\psi_{11} = \frac{(1-v^3)}{\xi} + v^3 \left(1 + 3n - n^2 + \frac{1}{5}n^3 \right);$$

$$\psi_{11} = \psi_{21} = \frac{(1-v^2)}{\xi} + v^2 \left(1 + 2n - \frac{1}{3}n^2 \right);$$

$$\psi_{22} = \frac{(1-v)}{\xi} + v(1+n).$$

В расчетной схеме нелинейного анализа использована пошаговая процедура метода последовательных нагружений, позволяющая в итерационном процессе разбить сложную задачу на ряд последовательных линейных задач [17]. На каждой i -й ступени проводится упругий анализ для системы канонических уравнений МП, записанных в приращениях с учетом фиксированных значений БПФ. С ростом длины ПЗ l_{pi} , переходя от одной ступени к другой, проводится корректировка поправочных БПФ $f_j(\alpha)$. Процесс нагружений продолжается до тех пор, пока найденная величина l_{pi} не достигнет расчетной l_p в пределах заданной точности вычислений ε : $(l_p - l_{pi}) \leq \varepsilon$, после чего определяются предельные усилия M_p и нагрузка F_p .

Для иллюстрации предложенного подхода приведен пример расчета стальной двухэтажной рамы на действие горизонтальных сил, моделирующих сейсмическое воздействие (рис. 2).

Исходные данные: ригели первого и второго этажей – двутавры № 40 ($I_x = 19062 \text{ см}^4$) и № 36 ($I_x = 13380 \text{ см}^4$); стойки первого и второго этажей – сдвоенные швеллеры № 33 ($I_x = 15\,960 \text{ см}^4$) и № 30 ($I_x = 11\,620 \text{ см}^4$). Материал – С345 ($R_{yn} = 34,5 \text{ кН/см}^2$; $R_B = 49 \text{ кН/см}^2$), $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$, $\delta_{02} = 1,643 \cdot 10^{-3}$, $\delta_B = 0,21$; модуль упругости $E_0 = 69,592 \text{ кН/см}^2$; $k_0 = E_0/E = 0,0033$.

Отношение пластического момента сопротивления к осевому принято равным $W_0/W_x = 1,17$. Предельный пластический и предельно-упругий моменты для ригелей первого этажа равны соответственно $M_0 = 381,43 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $M_e = 328,82 \text{ кН}\cdot\text{м}$, для стоек первого этажа – $M_{01} = 387,39 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $M_{e1} = 333,96 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Эшора предельных моментов M_p и соответствующая ей нагрузка $F_p = 119,7 \text{ кН}$ получены для заданной длины ПЗ, равной $l_p = 20 \text{ см}$ (рис. 3).

Первые пластические деформации появились при предельном пластическом значении силы $F_{p0} = 104,9 \text{ кН}$ в правой стойке нижнего этажа. Они характеризовались интенсивным развитием ПЗ вплоть до длины $l_{pi} = 10,14 \text{ см}$ (при $F_{pi} = 115,5 \text{ кН}$), пока не появилась ПЗ в левой стойке, после чего скорость развития пластических деформаций в правой стойке снизилась и в обеих зонах скорости стали одинаковыми (рис. 4).

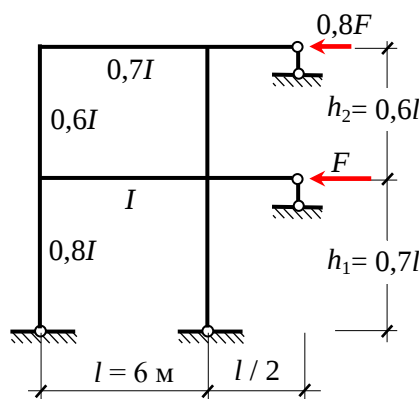


Рис. 2. Расчетная схема стальной двухэтажной рамы

альных зон, включая ПЗ. Построен расчетный алгоритм нелинейного анализа с пошаговой процедурой метода последовательных нагружений.

При моделировании НДС стержня введены две упрощающие предпосылки, согласно которым область физически-нелинейных деформаций стержня разбивается на две зоны (УПЗ и ПЗ). В результате получены зависимости для модуля упругости материала в УПЗ и момента инерции сечения в ПЗ. При выполнении расчетов статически неопределимых балок на единичные воздействия выведены безразмерные БПФ, учитывающие влияние специальных зон.

Сложная нелинейная задача разбита на ряд последовательных линейных задач. На каждой i -й ступени нагружения проводится анализ как для упругой системы с каноническими уравнениями метода перемещений, записанными в приращениях с учетом фиксированных значений БПФ.

Представленная схема статического нелинейного расчета рам с учетом упрочнения материала, базирующаяся на построении БПФ, может быть использована в сейсмическом расчете путем встраивания данной схемы в алгоритм математических моделей по расчету и колебаний сейсмостойких каркасов, в концевых элементах которых (ригелях и колоннах) возникают ПЗ.

Разработанная методика упругопластического расчета рам, вычислительные алгоритмы и программы могут быть использованы в учебном процессе при изучении дисциплины «Нелинейные задачи строительной механики».

Список литературы

1. Paulay, T. Shear Effect on Plastic Hinges of Earthquake Resisting Reinforced Concrete Frames / T. Paulay, I. N. Bull // *Comite Euro-International du beton. Bulletin d'Information*. – 1979. – No. 132. – P. 165 – 172.
2. Ehsani, R. E. Ductility and Moment Redistribution Capacity of Two-Span RC Beams / R. E. Ehsani, M. K. Sh. Sharbatdar, A. Kh. Kheyroddin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 90, No. 6. – P. 104 – 118. doi: 10.18720/MCE.90.10
3. Plastic Length in Reinforced Concrete Flexural Members / X. Zhao, Y.-F. Wu, A. Yt. Leung, H. F. Lam // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 14. – P. 1266 – 1274. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.159
4. Inel, M. Effects of Plastic Hinge Properties in Nonlinear Analysis Reinforced Concrete Buildings / M. Inel, H. B. Ozmen // *Journal of Engineering Structures*. – 2006. – Vol. 28. – P. 1494 – 1502. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.01.017
5. Yuan, F. Effect of Load Cycling on Plastic Hinge Length in RC Columns / F. Yuan, Y.-F. Wu // *Journal of Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 147. – P. 90 – 102. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.05.046
6. Yuan, F. Modelling Plastic Hinge of FRP-Confined RC Columns / F. Yuan, Y.-F. Wu, C.-Q. Li // *Journal of Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 131. – P. 651 – 668. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.018
7. Megalooikonomou, K.G. Effect of Yield Penetration on Column Plastic Hinge Length / K. G. Megalooikonomou, S. P. Tastani, S. J. Pantazopoulou // *Journal of Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 156. – P. 161 – 174. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.003
8. Co-Rotational Planar Beam Element with Generalized Elasto-Plastic Hinges / A. Alhasawi, P. Heng, M. Hjiaj, S. Guezouli, J.-M. Battini // *Journal of Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 151. – P. 188 – 205. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.07.085
9. Co-Rotating Rigid Beam with Generalized Plastic Hinges for the Nonlinear Dynamic Analysis of Planar Framed Structures Subjected to Impact Loading / P. Heng, A. Alhasawi, J.-M. Battini, M. Hjiaj // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2019. – Vol. 157. – P. 38 – 49. doi: 10.1016/j.finel.2018.11.003

10. Tidemann, L. A Robust Frame Element with Cyclic Plasticity and Local Joint Effects / L. Tidemann, S. Krenk // *Journal of Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 168. – P. 191 – 204. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.04.041
11. Numerical Study on a Fully-Prefabricated Damage-Tolerant Beam to Column Connection for an Earthquake-Resilient Frame / K. Deng, T. Wang, M. Kurata, C. Zhao, K. Wang // *Journal of Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 159. – P. 320 – 331. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.011
12. Experimental and Analytical Study of Fully Prefabricated Damage-Tolerant Beam to Column Connection for Earthquake-Resilient Frame / K. Deng, D. Zheng, C. Yang, T. Xu // *ASCE Journal of Structural Engineering*. – 2019. – Vol. 145, No. 3. – P. 04018264(10). doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002270
13. ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. – California. USA, 1996. – 334 p.
14. NZS 3101. Part 2. 2. 2006. Code of Design Practice for the Design of Concrete Structures. – New Zealand Standards Association. – Wellington. – 17 p.
15. Eurocode 8 (EUR 25204 EN – 2012): Seismic Design of Buildings. – Worked examples. – 522 p.
16. Потапов, А. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния стержня при упругопластическом изгибе / А. Н. Потапов, С. В. Штурмин // *Эксперт: теория и практика*. – 2022. – № 4(19). – С. 55 – 59.
17. Петров, В. В. Нелинейная инкрементальная строительная механика / В. В. Петров. – М. : Инфра-Инженерия, 2014. – 480 с.
18. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.

Elastic-Plastic Calculation of a Frame for the Action of Horizontal Forces Using the Displacement Method

A. N. Potapov, N. A. Zyambaev✉

*Department of Construction Production and Theory of Structures,
ziambaevna@susu.ru; South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia*

Keywords: tension; single-span beam; frame; plastic zone; yield strength; elastic-plastic deformations.

Abstract: An analytical approach has been developed to the elastic-plastic calculation of frames under the action of horizontal forces by the displacement method with linear strengthening of the material. For a single-span statically indeterminate beam, two simplifying premises are introduced, according to which the nonlinear region with the fluidity of fibers is divided into special zones: elastic-plastic and plastic. When modeling an elastic-plastic zone, the relationship between stress and strain intensities obeys the Prandtl diagram; when modeling a plastic zone (PZ), it obeys the linear hardening of the material. For single impacts, diagrams of moments in standard statically indeterminate beams, used in the main system of the displacement method, have been constructed. The calculated beam forces contain beam plastic functions (BPFs) that take into account the influence of the PZ. A calculation scheme for nonlinear analysis of frames has been created, representing a step-by-step procedure of successive loadings for the displacement method equations written in increments.

The nonlinear problem is divided into a number of sequential linear problems solved at each stage for fixed BPF values according to the elastic problem scheme. The transition to the next loading stage is accompanied by an increase in the length of the l_{pi} zone with subsequent adjustment of the BPF. The calculation process is completed when the values of the current and specified PZ lengths become equal within the error limits. An example of calculating a steel two-story frame for a horizontal load is considered.

References

1. Paulay T., Bull I.N. Shear Effect on Plastic Hinges of Earthquake Resisting Reinforced Concrete Frames, *Comite Euro-International du beton. Bulletin d'Information*, 1979, no. 132, pp. 165-172. (In Fran.)
2. Ehsani R.E., Sharbatdar M.K.Sh., Kheyroddin A.Kh. Ductility and moment redistribution capacity of two-span RC beams, *Magazine of Civil Engineering*, 2019, vol. 90, no. 6, pp. 104-118. doi: 10.18720/MCE.90.10
3. Zhao X., Wu Y.-F., Leung A.Yt., Lam H.F. Plastic length in reinforced concrete flexural members, *Procedia Engineering*, 2011, vol. 14, pp. 1266-1274. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.159
4. Inel M., Ozmen H.B. Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis reinforced concrete buildings, *Journal of Engineering Structures*, 2006, vol. 28, pp. 1494-1502. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.01.017
5. Yuan F., Wu Y.-F. Effect of load cycling on plastic hinge length in RC columns, *Journal of Engineering Structures*, 2017, vol. 147, pp. 90-102. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.05.046
6. Yuan F., Wu Y.-F., Li C.-Q. Modelling plastic hinge of FRP-confined RC columns, *Journal of Engineering Structures*, 2017, vol. 131, pp. 651-668. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.018
7. Megalooikonomou K.G., Tastani S.P., Pantazopoulou S.J. Effect of yield penetration on column plastic hinge length, *Journal of Engineering Structures*, 2018, vol. 156, pp. 161-174. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.003
8. Alhasawi A., Heng P., Hjiat M., Guezouli S., Battini J.-M. Co-rotational planar beam element with generalized elasto-plastic hinges, *Journal of Engineering Structures*, 2017, vol. 151, pp. 188-205. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.07.085
9. Heng P., Alhasawi A., Battini J.-M., Hjiat M. Co-rotating rigid beam with generalized plastic hinges for the nonlinear dynamic analysis of planar framed structures subjected to impact loading, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2019, vol. 157, pp. 38-49. doi: 10.1016/j.finel.2018.11.003
10. Tidemann L., Krenk S. A robust frame element with cyclic plasticity and local joint effects, *Journal of Engineering Structures*, 2018, vol. 168, pp. 191-204. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.04.041
11. Deng K., Wang T., Kurata M., Zhao C., Wang K. Numerical study on a fully-prefabricated damage-tolerant beam to column connection for an earthquake-resilient frame, *Journal of Engineering Structures*, 2018, vol. 159, pp. 320-331. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.011
12. Deng K., Zheng D., Yang C., Xu T. Experimental and analytical study of fully prefabricated damage-tolerant beam to column connection for earthquake-resilient frame, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2019, vol. 145, no. 3, pp. 04018264(10). doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002270
13. ATC-40 Seismic Evaluation and retrofit of concrete buildings. California. USA, 1996, 334 p.

14. NZS 3101. Part 2. 2. 2006. Code of design practice for the design of concrete structures. New Zealand Standards Association. Wellington, 17 p.
15. Eurocode 8 (EUR 25204 EN – 2012): Seismic design of buildings. Worked examples, 522 p.
16. Potapov A.N., Shturmin S.V. [Modeling the stress-strain state of a rod during elastoplastic bending], *Ekspert: teoriya i praktika* [Expert: theory and practice], 2022, vol. 4, no. 19, pp. 55-59. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Petrov V.V. *Nelineynaya inkremental'naya stroitel'naya mekhanika* [Nonlinear incremental structural mechanics], Moscow: Infra-Inzheneriya, 2014, 480 p. (In Russ.)
18. Sokolovskiy V.V. *Teoriya plastichnosti* [Plasticity theory], Moscow: Vysshaya shkola, 1969, 608 p. (In Russ.)
-

Elastisch-plastische Berechnung des Rahmens auf die Wirkung horizontaler Kräfte nach Verschiebungsmethode

Zusammenfassung: Es ist ein analytischer Ansatz zur elastisch-plastischen Berechnung von Rahmen unter Einwirkung horizontaler Kräfte nach der Verschiebungsmethode mit linearer Verstärkung des Materials entwickelt. Für einen einfeldrigen statisch unbestimmten Träger sind zwei vereinfachende Prämissen eingeführt, nach denen der nichtlineare Bereich mit der Fließfähigkeit der Fasern in spezielle Zonen unterteilt ist: elastisch-plastische und plastische. Bei der Modellierung der elastisch-plastischen Zone folgt die Abhängigkeit zwischen Spannungs- und Dehnungsintensitäten dem Prandtl-Diagramm, während sie bei der Modellierung der plastischen Zone (PZ) der linearen Verfestigung des Materials folgt. Für Einzelstöße sind Diagramme der Momente in statisch unbestimmten Standardträgern konstruiert, die im Hauptsystem der Verschiebungsmethode verwendet werden. Die Bemessungskräfte der Träger enthalten plastische Trägerfunktionen (BPFs), die den Einfluss von PZ berücksichtigen. Es ist ein Berechnungsschema für die nichtlineare Rahmenanalyse aufgestellt, das ein schrittweises sequenzielles Belastungsverfahren für die inkrementell geschriebenen Gleichungen der Verschiebungsmethode darstellt. Das nichtlineare Problem ist in eine Reihe sequentieller linearer Probleme unterteilt, die in jeder Phase für feste BPF-Werte gemäß dem elastischen Problemschema gelöst werden. Der Übergang zur nächsten Belastungsstufe geht mit einer Vergrößerung der Zonenlänge l_{pi} mit anschließender Anpassung der BPF begleitet. Der Berechnungsprozess ist abgeschlossen, wenn die Werte der aktuellen und der angegebenen PZ-Länge innerhalb der Fehlergrenzen gleich sind. Es ist ein Beispiel für die Berechnung des zweistöckigen Stahlrahmens auf die horizontale Belastung betrachtet.

Calcul élastoplastique d'un cadre sur l'action des forces horizontales par la méthode de déplacement

Résumé: Est élaboré l'approche analytique du calcul élasto-plastique des ossatures sous l'action d'efforts horizontaux par la méthode du déplacement avec renforcement linéaire du matériau. Pour une poutre à travée unique statiquement indéterminée, deux prémisses simplificatrices sont introduites, selon lesquelles la région non linéaire avec la fluidité des fibres est divisé en zones spéciales: élastoplastique et plastique. Lors de la modélisation d'une zone élastoplastique, la relation entre les intensités de contrainte et de déformation est soumise au diagramme de Prandtl; lors de la modélisation d'une zone plastique (ZP), elle est soumise au renforcement linéaire du

matériau. Pour les impacts uniques sont construits des diagrammes de moments dans des poutres standard statiquement indéterminées, utilisées dans le système principal de la méthode de déplacement. Les forces calculées des poutres contiennent des fonctions plastiques de poutre (FPP) qui prennent en compte l'influence de ZP. Est créé le schéma de calcul pour l'analyse non linéaire des cadres, représentant une procédure étape par étape de chargement séquentiel pour les équations de la méthode de déplacement, écrites par incréments. Le problème non linéaire est divisé en un certain nombre de problèmes linéaires séquentiels résolus à chaque étape pour des valeurs FPP fixes selon le schéma de problème élastique. Le passage à l'étape de chargement suivante s'accompagne d'une augmentation de la longueur de la zone l_{pi} avec ajustement ultérieur de la FPP. Le processus de calcul est terminé lorsque les valeurs des longueurs ZP actuelles et spécifiées deviennent égales dans les limites d'erreur. Est examiné un exemple de calcul d'une charpente en acier à deux étages sur une charge horizontale.

Авторы: *Потапов Александр Николаевич* – доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), профессор кафедры строительного производства и теории сооружений; *Замбаев Никита Александрович* – старший преподаватель кафедры строительного производства и теории сооружений, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ В КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЯХ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ИХ МОМЕНТНОЙ ЗАТЯЖКЕ

Г. В. Божко¹, М. С. Фокина^{2✉}, Ж. Д. Нконди¹, А. М. Щагин¹, А. П. Баскаков¹

Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии» (1);

Центр проектной деятельности, hitema@npp-htm.ru (2);

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

Ключевые слова: аналитическая зависимость; болт; динамометрический ключ; затяжка; крепежная деталь; момент усилия затяжки; осевая сила; резьба; тензодатчик; трение; фланец; экспериментальная зависимость.

Аннотация: Проанализированы результаты экспериментальной проверки аналитических выражений для определения осевой силы, возникающей в крепежной детали при затяжке ее крутящим моментом с помощью аттестованного динамометрического ключа. Представлены аналитические расчеты усилия в крепежных деталях по известным выражениям для болтов М12×1,75, М16×6 и М20×2,5 с построением графической зависимости усилия в стержне болта от момента затяжки и экспериментальные исследования той же зависимости на экспериментальной модели фланцевого соединения с использованием тензодатчиков, приклеенных к стержню болта. Приведены экспериментальная зависимость усилия от момента затяжки и выражение для его определения. Из анализа сравнения аналитических и экспериментальных выражений следует, что действительная нагрузка на болт меньше ее аналитического значения, что необходимо учитывать в расчетах.

Введение

В настоящее время большинство разъемных соединений оборудования химической и других отраслей промышленности затягивается крепежными резьбовыми деталями. Чтобы соединение было герметичным, особенно при работе оборудования под давлением, необходимо при его сборке создать определенное усилие в крепежных деталях. Наиболее широкое применение получили затяжки приложением крутящего момента к гайке и осевым растяжением стержня болта [1].

В статье проанализированы результаты экспериментальной проверки аналитических выражений для определения осевой силы, возникающей в крепежной детали при затяжке ее крутящим моментом с помощью аттестованного динамометрического ключа рычажного типа. Данный способ затяжки является наиболее простым и поэтому наиболее распространенным, но имеет недостаток – участие сил трения в силовом равновесии гайки, что существенно снижает его эффективность. Только около 10 % всей затрачиваемой на затяжку соединения работы является полезной – используется на создание осевой силы, до 50 % теряется на преодоление сил трения на торце гайки и до 40 % – на преодоление сил трения в резьбе [2].

Экспериментальная проверка аналитических выражений

Момент, приложенный к гайке при ее затяжке [3],

$$M = M_T + M_P, \quad (1)$$

где M_T – момент сил трения на торце гайки, Н·м; M_P – крутящий момент, действующий на стержень болта (шпильки) при затяжке, Н·м:

$$M_T = \frac{Q_{31} f_m (D_1^3 - d_0^3)}{3(D_1^2 - d_0^2)} = Q_{31} A; \quad (2)$$

$$M_P = \frac{Q_{31} d_2 \left[f_p + \frac{p}{\pi d^2} \right]}{2 \left[1 - \frac{f_p p}{\pi d^2} \right]} = Q_{31} B, \quad (3)$$

здесь Q_{31} – осевая сила, возникающая в стержне болта при затяжке, кН; D_1 – внешний диаметр опорного торца гайки, м; d_0 – диаметр отверстия под болт, м; d_2 – средний диаметр резьбы болта, м; p – шаг резьбы, м; f_T , f_P – коэффициенты трения соответственно на торце гайки и в резьбе. Значения коэффициентов трения f_T и f_P зависят от многих факторов: материала резьбовой пары, усилия затяжки, ее повторности, скорости завинчивания, вида покрытия резьбы и условия ее смазки, и определяются в диапазонах $f_T = 0,14 \dots 0,24$; $f_P = 0,32 \dots 0,52$ [4].

Используя выражения (2) и (3), получим:

$$M = Q_{31}(A + B); \quad Q_{31} = \frac{M}{A + B}. \quad (4)$$

Подставляя данные для трех болтов М12×1,75, М16×2, М20×2,5 значения $f_T = 0,19$, $f_P = 0,42$ и величину выбранных моментов в выражения (2) – (4), получим аналитические величины усилия в болте Q_{31} (табл. 1).

На рисунке 1 представлены аналитические зависимости усилия в болтах от момента затяжки. Под действием момента M в стержне болта возникают дополнительные касательные напряжения, напряжения кручения и т.д. На практике для обеспечения прочности соединения увеличивают диаметр стержня болта. Особенно нежелательно создание крутящего момента ударной нагрузкой на рычаг ключа [5]. В таком случае достигается значительная сила затяжки. Однако данный способ приводит к возникновению дополнительных напряжений от прогиба стержня болта.

Таблица 1

Результаты расчетов по выражениям (4)

Болт	D_1	d_0	d_2	p	$(A + B) 10^3, \text{ м}$	$Q_{31}, \text{ кН}$
	мм					
М12×1,75	17,1	14	11,513	1,75	4,226	0,24 <i>M</i>
М16×2	22,8	18	14,700	2,00	5,480	0,18 <i>M</i>
М20×2,5	28,5	22	18,376	2,50	6,750	0,14 <i>M</i>

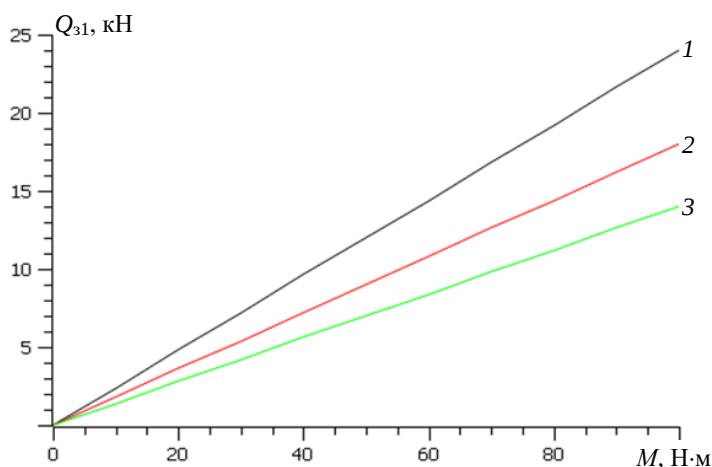


Рис. 1. Аналитическая зависимость осевой силы $Q_{з1}$ от момента для затяжки болтов:
 1 – М12 $Q_{з1} = 0,24M$; 2 – М16 $Q_{з1} = 0,18M$; 3 – М16 $Q_{з1} = 0,14M$

В представленных выражениях (2) и (3) не учитываются дополнительные деформации, возникающие в стержне крепежного элемента в процессе его затяжки, на которые также расходуется момент затяжки, уменьшая при этом осевую силу в болте. Кроме того, неправильно выбранные коэффициенты трения также влияют на определение осевой силы, необходимой для создания герметичности разъёмного соединения.

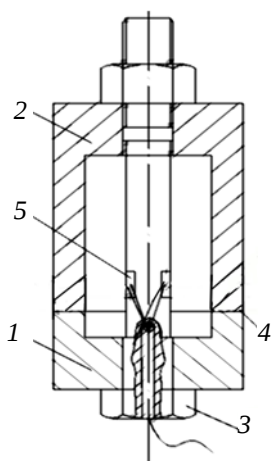
Для проведения ряда экспериментов по исследованию новых видов уплотнений для оборудования нефтехимических производств необходимо точно знать значение осевого усилия, возникающего в крепежном элементе при затяжке его динамометрическим ключом. Проведены экспериментальные исследования по определению действительной осевой силы, возникающей в стержне болта при затяжке фланцевого соединения динамометрическим ключом.

Физическая модель состоит из стальных втулок нижней 1 и верхней 2, контактирующих по поверхности 4, имитирующих фланцы, болта 3 с тензодатчиками 5 (рис. 2). Втулки изготовлены из стали 45, наружный диаметр втулок – 60 мм, внутренний – 40 мм. Втулки стягиваются болтом М16×2. На стержень болта наклеены три тензодатчика под углом 120° с их последовательным соединением. Внутри болта сделано отверстие $d = 3$ мм для выхода проводов тензодатчиков к тензостанции, усилителю сигнала и компьютеру (на рисунке не показаны).

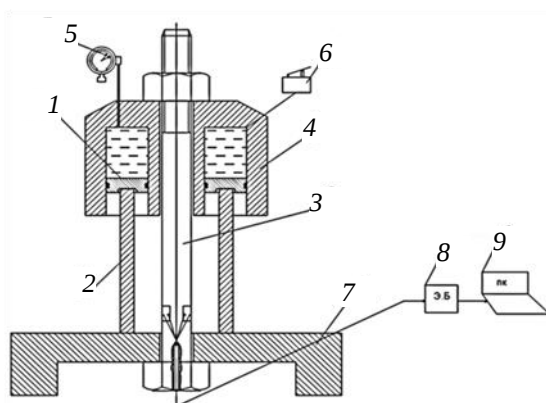
Для проведения эксперимента тензодатчики тарировались, для чего создана установка, представленная на рис. 3.

Тарировка тензодатчиков является процессом определения соотношения между физическими величинами, измеряемыми тензодатчиками (например, деформация стержня, для определения усилия) и преобразуемыми в соответствующий электрический сигнал, который они генерируют. Данный процесс необходим для корректного преобразования измеренных значений тензодатчика в физическую величину.

Установка работает следующим образом: насос высокого давления 6 подает жидкость (масло) в гидроцилиндр 4 под давлением, необходимым для создания механической нагрузки на болт 3 (см. рис. 3). Поршень 1 под давлением масла перемещается, создавая требуемую осевую нагрузку на болт, деформацию которого фиксируют тензодатчики с помощью цифр.



**Рис. 2. Модель
для исследования**



**Рис. 3. Схема установки для тарировки
тензодатчиков:**

1 – поршень; 2 – силовая втулка; 3 – болт; 4 – гидроцилиндр; 5 – манометр; 6 – насос высокого давления; 7 – опорная плита; 8 – электронный блок управления; 9 – компьютер с контрольно-измерительным программным обеспечением

Электронный блок 8 управления контролирует работу установки и обработку данных с тензодатчиков. Компьютер 9 с контрольно-измерительным программным обеспечением используется для сбора и анализа данных, полученных от электронного блока, и построения кривой тарировки.

При известной площади поршня определялась осевая сила на болт Q_6 , Н:

$$Q_6 = 0,785Pf(D^2 - d^2), \quad (5)$$

где P – давление (показание образцового манометра, который используется для измерения давления в гидроцилиндре и контроля создаваемых механических нагрузок), Н/м²; D и d – внешний и внутренний диаметры поршня соответственно, м;

f – коэффициент, учитывающий потери усилия на трение в уплотнениях поршня.

При проведении экспериментов болт 3 предварительно вручную затягивался до полного контакта сопрягаемых поверхностей, фиксировались нулевые показания тензодатчиков. При тарировке ступенчато создавалась нагрузка на болт, и на каждой ступени фиксировались показания тензодатчиков, из которых вычитались нулевые значения. Таким образом, получали зависимость $Q_6 = f(n)$, где n – показания тензодатчиков. На рисунке 4 в качестве примера представлена тарировочная кривая болта М16×2.

Такая же тарировка тензодатчиков проведена для болтов М12×1,75 и М20×2,5 той же прочности материала, класс болтов – 10,9. Используя модель фланцевого соединения (см. рис. 2), проведены эксперименты по получению экспериментальной зависимости усилия в крепежных элементах М12, М16 и М20 от создаваемого момента затяжки с помощью динамометрического ключа – $Q_3 = f(M)$. Для этого собиралась экспериментальная модель с одним из указанных болтов. Соединение затягивалось вручную до полного контакта всех соединяемых деталей. Датчики соединялись с компьютером через электронные блоки, и записывались нулевые показания тензодатчиков.

Далее ступенчато проводилось нагружение болта с помощью динамометрического ключа. На каждой ступени фиксировались показания момента на ключе

и тензодатчиков за минусом нулевого значения, по которым с помощью тарифовочной кривой (см. рис. 4) определялась осевая сила в болтах.

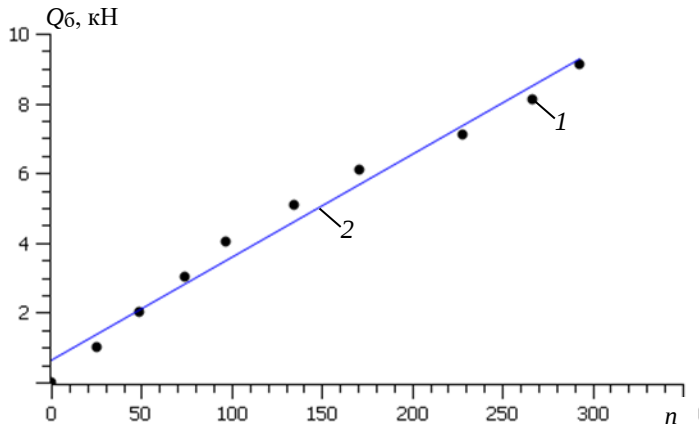


Рис. 4. Тарифовочная кривая нагружения болта М16×2:
 1 – показания тензодатчика n ;
 2 – линейная аппроксимация $Q = 0,0295n + 0,6$

На рисунке 5 в качестве примера представлены результаты экспериментов в сравнении с аналитическими данными для болта М16×2. Полученные аналитические и экспериментальные зависимости $Q_3 = f(M)$ описываются выражениями, представленными в табл. 2.

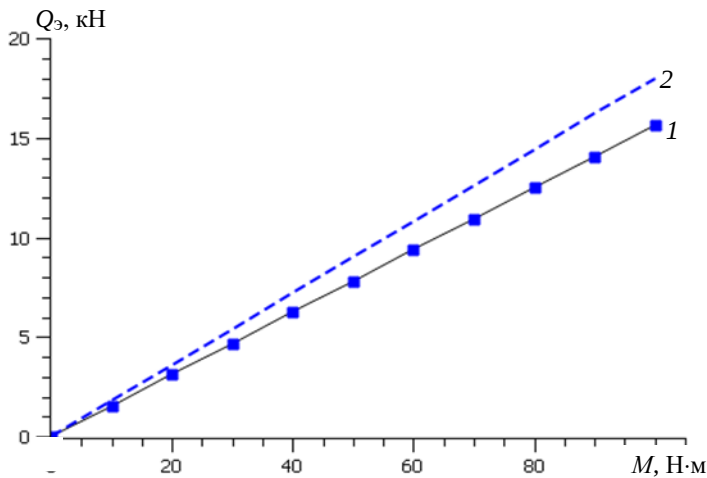


Рис. 5. Сравнение аналитических (1) и экспериментальных (2) данных для болта М16×2,5

Таблица 2

Аналитические и экспериментальные выражения зависимости $Q_3 = f(M)$

Болт	Осевая сила, кН	
	$Q_a = Q_{31}$	Q_3
М12×1,75	$0,24M$	$0,1773M$

M16×2	0,18M	0,1563M
M20×2,5	0,14M	0,1305M

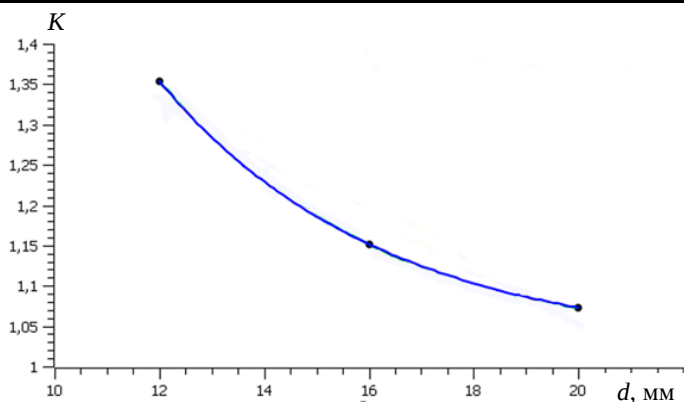


Рис. 6. Зависимость соотношения K от диаметра болта

Заключение

Анализ полученных данных сводится к сравнению аналитических и экспериментальных данных зависимостей усилия, возникающего в болте, от момента его затяжки. Из анализа следует, что экспериментальные значения усилия $Q_э$ в стержне болта ниже аналитических Q_a при одной величине момента его затяжки, что следует из уменьшения угла наклона экспериментальных кривых для всех болтов, подвергнутых испытаниям. Приведем соотношения тангенсов угла наклона K аналитических и экспериментальных кривых для болтов:

- M12×1,75 $K = 1,36$;
- M16×2 $K = 1,15$;
- M20×2,5 $K = 1,07$.

Следовательно, для определения действительного усилия в стержне болта Q_d от момента его затяжки аналитическим путем необходимо полученное значение разделить на соотношение K

$$Q_d = \frac{Q_a}{K}.$$

Соотношение K неодинаково для всех болтов и зависит от их диаметров. На рисунке 6 представлена зависимость значения соотношения K от диаметра болта, из которой следует, что с увеличением диаметра болта отношение значений аналитических и экспериментальных данных уменьшается, асимптотически приближаясь к единице. Кривая на рис. 6 описывается выражением

$$K = 1,89e^{-0,029d},$$

где d – диаметр болта, мм.

Список литературы

1. Продан, В. Д. Техника герметизации разъемных неподвижных соединений / В. Д. Продан. – М. : Машиностроение, 1991. – 160 с.
2. Продан, В. Д. Герметичность оборудования : учеб. пособие / А. Д. Продан, Г. В. Божко. – М. : Ун-т Машиностроения, 2014. – 108 с.

3. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник/ И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

4. Якушев, А. И. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений / А. И. Якушев, Р. Х. Мустаев, Р. Р. Мавлютов. – М. : Машиностроение, 1979. – 215 с.

5. Гельфанд, М. Л. Сборка резьбовых соединений / М. Л. Гельфанд, Я. И. Циценюк, О. К. Кузнецов. – М. : Машиностроение, 1978. – 109 с.

Experimental Determination of the Axial Force in Fastening Parts Arising upon their Torque Tightening

G. V. Bozhko¹, M. S. Fokina^{2✉}, J. D. Nkondi¹, A. M. Shchagin¹, A. P. Baskakov¹

Department of Processes and Apparatus of Chemical Technology (1);

Project Activity Center, hitema@npp-htm.ru (2);

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Keywords: analytical dependence; bolt; torque wrench; puff; fastener; tightening torque; axial force; thread; strain gauge; friction; flange; experimental dependence.

Abstract: The results of an experimental verification of analytical expressions for determining the axial force arising in a fastener when tightening it with torque using a certified torque wrench are analyzed. Analytical calculations of the force in fasteners are presented using known expressions for bolts M12×1.75, M16×6 and M20×2.5 with the construction of a graphical dependence of the force in the bolt rod on the tightening torque and experimental studies of the same dependence, on experimental model of a flange connection using strain gauges glued to the bolt rod. The experimental dependence of the force on the tightening torque and the expression for its determination are given. From the analysis comparing analytical and experimental expressions it follows that the actual load on the bolt is less than its analytical value, which must be taken into account in the calculations.

References

1. Prodan V.D. *Tekhnika germetizatsii raz'yemnykh nepodvizhnykh soedineniy* [Sealing technique of detachable fixed joints], Moscow: Mashinostroyeniye, 1991, 160 p. (In Russ.)

2. Prodan A.D., Bozhko G.V. *Germetichnost' oborudovaniya: ucheb. posobiye* [Tightness of equipment: textbook. allowance], Moscow: Universitet Mashinostroyeniya, 2014, 108 p. (In Russ.)

3. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin : spravochnik* [Calculation of the strength of machine parts: reference book], Moscow: Mashinostroyeniye, 1993, 640 p. (In Russ.)

4. Yakushev A.I., Mustaev R.H., Mavlyutov R.R. *Povysheniye prochnosti i nadezhnosti rez'bovykh soedineniy* [Increasing the strength and reliability of threaded connections], Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 215 p. (In Russ.)

5. Gelfand M.L., Tsitsenyuk Ya.I., Kuznetsov O.K. *Sborka rez'bovykh soyedineniy* [Assembly of threaded connections], Moscow: Mashinostroyeniye, 1978, 109 p. (In Russ.)

Experimentelle Bestimmung der Axialkraft in Verbindungselementen, die beim Anzugsdrehmoment entstehen

Zusammenfassung: Die Ergebnisse der experimentellen Überprüfung der analytischen Ausdrücke für die Bestimmung der Axialkraft, die in einem Verbindungselement entsteht, wenn es mit einem Drehmoment unter Verwendung des zertifizierten Drehmomentschlüssels angezogen wird, sind ausgewertet. Es sind analytische Berechnungen der Kraft in Verbindungselementen gemäß den bekannten Ausdrücken für Schrauben M12×1,75, M16×6 und M20×2,5 mit der Konstruktion der grafischen Abhängigkeit der Kraft in der Schraubenstange vom Anzugsdrehmoment und experimentelle Untersuchungen der gleichen Abhängigkeit am Versuchsmodell der Flanschverbindung unter Verwendung von auf die Schraubenstange geklebten Dehnungsmessstreifen vorgestellt. Die experimentelle Abhängigkeit der Kraft vom Anzugsmoment und der Ausdruck für ihre Bestimmung sind angegeben. Aus dem Vergleich der analytischen und experimentellen Ausdrücke ergibt sich, dass die tatsächliche Belastung der Schraube geringer ist als ihr analytischer Wert, was bei den Berechnungen berücksichtigt werden soll.

Détermination expérimentale de la force axiale dans les pièces de fixation survenant lors de leur serrage au couple

Résumé: Sont analysés les résultats d'un test expérimental d'expressions analytiques pour déterminer la force axiale apparaissant dans une fixation lorsqu'elle est serrée au couple à l'aide d'une clé dynamométrique certifiée. Sont présentés les calculs analytiques de la force dans les fixations utilisant des expressions connues pour les boulons M12×1,75, M16×6 et M20×2,5 avec la construction d'une dépendance graphique de la force dans la tige du boulon sur le couple de serrage et des études expérimentales de la même dépendance sur un modèle expérimental d'assemblage à bride utilisant des jauges de contrainte collées sur l'arbre du boulon. Sont données la dépendance expérimentale de la force sur le couple de serrage et l'expression pour sa détermination. De l'analyse et de la comparaison des expressions analytiques et expérimentales, il s'ensuit que la charge réelle sur le boulon est inférieure à sa valeur analytique ce qui doit être prise en compte dans les calculs.

Авторы: *Божко Григорий Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; *Фокина Мария Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент, Центр проектной деятельности; *Нконди Жоспин Диасонама* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; *Щагин Александр Михайлович* – магистрант; *Баскаков Антон Павлович* – студент, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия.

ДЛЯ ЗАМЕТОК